

Tesis de pregrado: Tráfico controlado en cosecha de caña de azúcar: Propuesta metodológica de validación con un caso de estudio

Por: Jorge Alexander Celades Martínez

Tutor: Ing. Diego Fernando Vasco Gutiérrez

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnologías e Ingenierías - ECBTI

Ingeniería Electrónica

Santiago de Cali

2019



Contenido

Contenido	ii
Lista de Acrónimos.....	i
Lista de Tablas.....	ii
Lista de Figuras	iii
1	
Introducción.....	1
1.1. Planteamiento del Problema	1
1.2. Justificación	2
1.3. Objetivos	4
1.3.1. <i>Objetivo General</i>	4
1.3.2. <i>Objetivos Específicos</i>	4
1.4. Metodología	4
1.4.1. <i>Fase de Investigación:</i>	5
1.4.2. <i>Fase de Planeación:</i>	6
1.4.3. <i>Fase de Pruebas:</i>	6
1.4.4. <i>Fase de Implementación:</i>	6
1.4.5. <i>Resultados:</i>	7
2	
Marco de Referencia.....	8
2.1. Marco conceptual	8
2.1.1. <i>Global Navigation Satellite System (GNSS)</i>	8
2.1.2. <i>Real Time Kinematic (RTK)</i>	9
2.1.3. <i>Piloto automático agrícola (Autosteering)</i>	10
2.1.4. <i>Tráfico Agrícola Controlado (TAC)</i>	11
2.2. Marco legal	11
2.2.1. <i>Uso del espectro electromagnético</i>	12
2.2.2. <i>Uso del espacio aéreo</i>	12
2.3. Estado del Arte	14
2.3.1. <i>Uso del tráfico agrícola controlado a nivel internacional</i>	14
2.3.2. <i>Estudios del uso de AP a nivel nacional</i>	16
3	
Investigación.....	17
3.1. Sistema de transmisión <i>RTK</i>	17
3.3.1. <i>Antena GNSS</i>	17
3.3.2. <i>Receptor GNSS</i>	18
3.3.3. <i>Sistema de transmisión de información</i>	22
3.2. Documentación de las aplicaciones de <i>RTK</i> en el cultivo de caña de azúcar	25

3.3.1.	<i>Nivelación GNSS</i>	26
3.3.2.	<i>Fotografía aérea con UAV.....</i>	27
3.3.3.	<i>Surcado de precisión (autoguía).....</i>	29
3.3.4.	<i>Cosecha con proyecto de líneas (autoguía).....</i>	29
4		
Planeación.....		31
4.1.	Definición de la metodología para ejecutar el caso de estudio	31
4.2	Definición de los requerimientos para la metodología	32
4.2.1	<i>Revisión de los parámetros establecidos por la estación RTK y las cosechadoras.....</i>	32
4.2.2	<i>Revisión de la logística de campo para la ejecución de cosecha</i>	33
4.2.3	<i>Adquisición de datos para el análisis de resultados</i>	34
4.3.	Integración del plan de trabajo para abordar el caso de estudio	35
4.3.1.	<i>Lote experimental</i>	35
4.3.2.	<i>Descripción de cosechadoras.....</i>	35
4.3.3.	<i>Diseño experimental</i>	36
4.3.4.	<i>Mediciones.....</i>	37
4.3.5.	<i>Análisis estadístico.....</i>	37
5		
Pruebas		39
5.1.	Pruebas de comunicación de la señal <i>RTK</i>	39
5.2.	Pruebas de funcionamiento del piloto automático para hacer TAC	43
6		
Resultados & Discusiones.....		45
6.1.	Resultados	45
6.2.	Discusión general	51
7		
Conclusiones		53
Referencias		56

Lista de Acrónimos

AP	A gricultura de P recisión
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
TAC	T ráfico A grícola C ontrolado
RTK	<i>Read Time Kinematic</i>
CTF	<i>Controlled Traffic Farming</i>
RUP	<i>Rational Unified Process</i>
UML	<i>Unified Modeling Language</i>
XP	<i>Extrême Programming</i>
SIG	S istemas de I nformación G eográfica
GEI	G ases de E fecto I nteractivo
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GLONASS	<i>GLObalnaya NAvigatsionnaya Sputnikovaya Sistema</i>
QZSS	<i>Quasi-Zenith Satellite System</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
HMI	<i>Human – Machine Interface</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
ANE	A gencia N acional del E spectro
RPAS	<i>Remotely Piloted Aircraft Systems</i>
SRCT	<i>Singel Row Controlled Traffic</i>
DRCT	<i>Double Row Controlled Traffic</i>
ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
PVT	<i>Position, Velocity, Time</i>
CMR	<i>Compact Measurement Record</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
AIC	<i>Akaike Information Criteria</i>
NMEA	<i>National Marine Electronics Association</i>

Lista de Tablas

<i>Tabla I Descripción de componentes del receptor GNSS (Kaplan & Hegarty, 2017)</i>	<i>19</i>
<i>Tabla II Descripción de la trama GGA (Trimble, 2019).</i>	<i>42</i>
<i>Tabla III Análisis de tiempos en la operación de cosecha.....</i>	<i>50</i>

Lista de Figuras

<i>Figura 1. Estrategia metodológica implementada.....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2. Constelaciones del sistema GNSS.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 3. lustración del sistema RTK.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 4. Componentes de sistema autoguía.</i>	<i>11</i>
<i>Figura 5. Asignación de espectro (Mintic, 2019.).....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 6. Tipos de antenas GNSS (Wang, 2012)</i>	<i>18</i>
<i>Figura 7. Antena GNSS grande (estación base) y mediana (vehículo).....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 8. Diagrama de bloques de un receptor GNSS genérico (Kaplan & Hegarty, 2017).</i>	<i>19</i>
<i>Figura 9. Receptores GNSS. De izquierda a derecha:.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 10. Cobertura de red de Claro en el valle geográfico del río Cauca (Claro, 2019).</i>	<i>23</i>
<i>Figura 11. Simulador de propagación de señal UHF en 450 MHz (HeyWhatsThat WISP, 2019).....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 12. Descripción geométrica de la zona de Fresnel (Saunders & Aragón-Zavala, 2007).....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 13. Tractores realizando labores de nivelación con GNSS (Topcon, 2015).....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 14. Imagen aérea de cultivo de caña de azúcar con proyecto de líneas para cosecha.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 15. Tractor realizando labores de surcado de precisión para caña de azúcar</i>	<i>29</i>
<i>Figura 16. Operario realizando labores de cosecha con autoguía.</i>	<i>30</i>
<i>Figura 17. Diagrama descriptivo de la etapa de planeación.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 18. Control de flota de maquinaria por medio de telemetría (Case IH, 2019).....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 19. Esquema de diseño experimental implementado en caso de uso. Las siglas Con y Sin significa las unidades experimentales que tuvieron (con) o no (sin) activado el uso de señal GNSS-RTK.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 20. Cobertura de la estación CCPM (HeyWhatsThat WISP, 2019).....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 21. Disposición de señal RTK, Capri 302 (HeyWhatsThat WISP, 2019).....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 22. Perfil de línea de vista entre estación base y Capri 302 (HeyWhatsThat WISP, 2019).....</i>	<i>40</i>

<i>Figura 23. Composición del dispositivo móvil de recepción RTK.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 24. Mapa de conectividad RTK, Capri 302.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 25. Panel de diagnóstico de CMR en pantalla Pro700.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 26. Mapa de brecha de distancia en los trayectos de las cosechadoras.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 27. Brechas de distancia según tipo de zona y uso de autoguía.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 28. Consumo de combustible según tipo de zona y uso de autoguía. Medias con letra común no tienen diferencia significativa (valor $p > 0.05$; Prueba DMS Fischer).....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 29. Potencia del motor según tipo de zona y uso de autoguía. Medias con letra común no tienen diferencia significativa (valor $p > 0.05$; Prueba DMS Fischer).....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 30. Mapa de velocidad en los trayectos de las cosechadoras.</i>	<i>47</i>
<i>Figura 31. Velocidad según tipo de zona y autoguía. Medias con letra común no tienen diferencia significativa (valor $p > 0.05$; Prueba DMS Fischer).</i>	<i>48</i>
<i>Figura 32. Combustible utilizado según la velocidad.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 33. Mapa de tipo de suelo.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 34. Relación de velocidad con textura de suelo.....</i>	<i>50</i>

Abstract

In recent years, Controlled Traffic Farming (CTF) has been adopted as a high precision alternative to do sugarcane harvesting. This tool automates the movement of the vehicle by controlling the steering of wheels. Currently, validations that demonstrate the benefits of the use of CTF in crops are unknown. Therefore, this research presents a methodological proposal to validate the performance of CTF using GNSS-RTK signal. This document is deployed into two parts: description of components and validation. In the component description stage, a characterization of the requirements necessary to do TAC in harvest was realized, consequently, an investigation of the components at a technical, logistic and operational level was done. In the validation stage, the harvest operation was executed using TAC under a case study that allowed us to obtain operational metrics, such as fuel consumption and path displacement error. This test was deployed during an operation period of twelve hours. The outcomes show a decrease in fuel consumption when operating with an autoguiding system. Additionally, there is a decrease in the harvester guiding error. In this way, the study validated the improvement in performance with the use of the CTF with GNSS-RTK signal in sugarcane harvesting works in the geographical valley of Cauca River. Due to the evident advantages using this methodology, it is suggested to replicate the study presented in different conditions of sugarcane crops, in order to characterize the behavior of two variables evaluated.

Key Words—Autoguiding, CTF, GNSS-RTK, sugarcane harvesting.

Resumen

El Tráfico Agrícola Controlado (TAC) es una alternativa tecnológica para optimizar la eficiencia de uso de maquinaria en labores de cosecha de caña de azúcar. Esta alternativa automatiza el desplazamiento del vehículo mediante el control del volante. En la actualidad se desconocen validaciones que evidencien los beneficios del uso de TAC en labores del campo. En consecuencia, se requieren trabajos que validen el desempeño del TAC con el uso de señal *GNSS-RTK*. El presente trabajo se divide en dos partes: descripción de componentes y validación. En la etapa de descripción de componentes, se realizó una caracterización de los requerimientos necesarios para hacer TAC en cosecha, se realizó una investigación de los componentes a nivel técnico, logístico y operativo. En la etapa de validación, se llevó a cabo la operación de cosecha usando TAC bajo un caso de estudio que permitió obtener métricas operativas como consumo de combustible y error de desplazamiento de trayectos. El ensayo se realizó durante un periodo de operación de doce horas. Los resultados exponen una disminución en el consumo de combustible al operar con un sistema autoguía. Adicionalmente, se evidencia una disminución en el error de trayectoria de la cosechadora. Validando la mejora en el rendimiento con el uso del TAC con señal *GNSS-RTK* en labores de cosecha de caña de azúcar en el valle geográfico del río Cauca. Ante las evidentes ventajas obtenidas gracias a la implementación de esta metodología, se sugiere replicar el caso de estudio expuesto en esta tesis para diferentes condiciones del cultivo de caña de azúcar, con el fin de caracterizar el comportamiento de las dos variables evaluadas.

Palabras Clave—Autoguía, cosecha de caña de azúcar, *GNSS-RTK*, TAC.

A mi madre Carmen Martínez y mi hermana Andrea Celades, quienes creyeron ciegamente en mí y me apoyaron en estos años de esfuerzo y dedicación.

A mi prometida Melissa Diago. La mujer que me tendió su mano amorosa e incondicional cuando más la necesité, quien prometió compartir los pasos de mi caminar. Mi motivación, mi ángel, mi gran amor...

Agradecimientos

Al creador, por permitir mi paso por la tierra para cumplir las metas propuestas a lo largo de mi vida.

A mi tutor Diego Fernando Vasco, por apoyarme en la finalización de esta valiosa etapa académica, con su colaboración, pude materializar el cumplimiento de mi tesis con gran orgullo.

Al Dr. Mauricio Castro, por tener ciega confianza en mi trabajo. Gracias a su contribución, pude comprender que mereces cuanto sueñas.

Al Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (Cenicaña), por darme la oportunidad de contribuir al sector agroindustrial a través de la investigación en la aplicación de nuevas tecnologías.

Introducción

1.1. Planteamiento del Problema

El sector agroindustrial de la caña de azúcar en el valle del Cauca utiliza varios tipos de maquinaria agrícola para sus actividades de campo. Por este motivo, permanentemente se plantean inquietudes con respecto al uso inadecuado e ineficiente de esta maquinaria, debido a que este podría tener un sensible impacto ambiental, productivo y económico (Gasso, Oudshoorn, Sørensen, & Pedersen, 2014). La demanda de alternativas tecnológicas que permitan aumentar la eficiencia de uso de maquinaria, viene aumentando considerablemente en la última década en el sector agroindustrial de la caña de azúcar y al respecto, pocas opciones y desarrollos han sido propuestos (Stafford & Werner, 2003).

El tráfico no controlado de maquinaria agrícola es un factor predecesor de varios procesos de degradación del suelo (Gasso et al., 2014), generando consecuencias nocivas sobre la productividad e impacto ambiental del sistema agroproductivo. En ese contexto, criterios numéricos para cuantificar la intensidad de tráfico de maquinaria dentro de los lotes agrícolas, deben ser generados para mitigar la degradación del suelo (Soane & Ouwerkerk, 2013). En la actualidad, el sector agroindustrial de la caña de azúcar del Valle del Cauca no dispone de un sistema homogéneo y general que le permita generar criterios numéricos de gestión de maquinaria agrícola.

La implementación de agricultura de precisión (AP) permite (i) cuantificar y aumentar la eficiencia de uso de maquinaria (Zhang, Wang, & Wang, 2002) y (ii) aumentar la eficiencia de uso de insumos (Bongiovanni & Lowenberg-Deboer, 2004). AP compila un conjunto de tecnologías que combinan sensores, sistemas de información, herramientas GNSS, maquinaria agrícola y prácticas de manejo para optimizar la productividad de los cultivos a partir de la cuantificación de la variabilidad espacial de sus factores limitantes (Oliver, 2010). Desde un enfoque práctico, AP y tráfico agrícola controlado están cerradamente asociados (Reina, Milella, & Galati, 2017). Debido a esto, el sector agroproductivo de la caña de azúcar del Valle del Cauca viene implementando y validando varias herramientas de AP.

El uso de señal GNSS – RTK es una herramienta de AP que permite generar de manera puntual, sistemas de tráfico agrícola controlado (Perez-Ruiz, Slaughter, Gliever, & Upadhyaya, 2012). La función de GNSS - RTK es permitir corrección geoposicional de

hasta ~2.5 cm de una maquina agrícola que disponga de la tecnología de recepción de estas señales (Kingwell & Fuchsbichler, 2011). En la actualidad, el sector agroproductivo de la caña de azúcar en el Valle del Cauca ha realizado una importante inversión económica, técnica, tecnológica y logística para disponer de señal GNSS – RTK (Cenicaña, 2017). Sin embargo, a partir de la disponibilidad de esta señal, se requieren generar componentes tecnológicos adicionales tales como (i) un sistema telemático para mantenimiento remoto de las estaciones GNSS-RTK; (ii) un sistema de verificación de constelación satelital; (iii) herramientas para el control de programas informáticos; (iv) un sistema de gestión de comunicaciones; (v) un sistema de verificación de edad de corrección; y (vi) un sistema de verificación de líneas de surcado. Se hipotetiza que solo a partir de estos componentes será posible generar criterios numéricos de gestión de maquinaria que permitan aumentar su eficiencia.

De acuerdo con lo expuesto, esta tesis se propone responder: *¿un sistema de tráfico agrícola controlado generado a partir de la disponibilidad de señal GNSS-RTK y sus componentes complementarios, permite aumentar la eficiencia de uso de maquinaria y la implementación de prácticas de AP en el contexto agroproductivo de la caña de azúcar en el Valle del Cauca?*

1.2. Justificación

Los sistemas agroproductivos de caña de azúcar en el Valle del Cauca se caracterizan por utilizar maquinaria agrícola mayor a 10 Ton de peso, en la mayoría de sus labores de campo. En carencia de tráfico no controlado de maquinaria, el área de suelo transitado durante estas labores puede no ser mayor al 50% del área total (Kingwell & Fuchsbichler, 2011). Este proceso repetido sucesivamente genera una degradación del suelo la cual se manifiesta en aumento de la compactación, reducción de la tasa de infiltración de agua y por ende, reducción de la productividad del cultivo.

En la actualidad, no se tiene evidencia de trabajos de investigación que validen el uso de la señal GNSS-RTK para implementar y optimizar el tráfico agrícola controlado, dentro del contexto agroproductivo de la caña de azúcar en el Valle del Cauca. La hipótesis de esta carencia es que no se tiene desarrollados y validados varios de los componentes tecnológicos complementarios que demanda el uso de la señal GNSS-RTK para el tráfico controlado de la maquinaria agrícola. En ese contexto, este trabajo propone desarrollar y validar algunos componentes claves que permitan el uso óptimo de señal GNSS-RTK en maquinaria agrícola.

Un sistema automático de tráfico agrícola controlado de maquinaria agrícola para caña de azúcar, demanda que sea de abierto, genérico y de fácil configuración a

diferentes tipos de máquinas y principalmente, con énfasis en tráfico controlado de cosechadoras. Además, que cuente con un sistema remoto de diagnóstico y mantenimiento de señal.

Específicamente, los componentes tecnológicos en los que se hará énfasis de desarrollo y validación en esta tesis serán: (i) un sistema telemático para mantenimiento remoto de las estaciones GNSS-RTK; (ii) un sistema de verificación de constelación satelital; (iii) herramientas para el control de programas informáticos; (iv) un sistema de gestión de comunicaciones; (v) un sistema de verificación de edad de corrección; y (vi) un sistema de verificación de líneas de surcado.

El desarrollo y validación del sistema telemático para mantenimiento remoto de las estaciones GNSS-RTK es clave para detectar, diagnosticar y reparar de una manera precisa y económica la señal RTK en campo. El desarrollo y validación del sistema de verificación de constelación satelital permitirá confirmar la precisión de los receptores GNSS, garantizando un correcto geoposicionamiento en la navegación y manejo del sistema de piloto automático de las máquinas; El desarrollo y validación de herramientas para el control de programas informáticos permitirá garantizar la debida configuración informática que soporte los estándares para la automatización o uso de programas informáticos en tiempos real; Además, proporcionará el control de ejecución de algoritmos. El desarrollo y validación de un sistema de gestión de comunicaciones permitirá disponer de un control que regule la interacción entre componentes. El desarrollo y validación de un sistema de verificación de edad de corrección permitirá optimizar la corrección de posicionamiento en tiempo real. Finalmente, el desarrollo y validación de un sistema de verificación de líneas de surcado garantizará la optimización de labores dentro del contexto de implementación de AP.

La evaluación práctica resaltando las ventajas económicas, ambientales y operativas de los componentes desarrollados debe ser realizada en condiciones de campo y con maquinaria de uso cotidiano. Debido a esto, se propone un ensayo de cosecha mecánica debido a que es una de las labores mecánicas que mayor demanda de tráfico controlado. Complementariamente, el efecto del uso del sistema automático de tráfico controlado se evaluará a través de métricas de labor mecánica seleccionadas. Esto permitirá, tener un diagnóstico práctico de uso del sistema propuesto.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Desarrollar una metodología tecnológica para validar la cosecha mediante Tráfico Agrícola Controlado (TAC) en los procesos de agricultura de precisión para cultivos de caña de azúcar

1.3.2. Objetivos Específicos

- I. Caracterizar los requerimientos tecnológicos y los parámetros del escenario elegido para la implementación de tráfico agrícola controlado en caña de azúcar en el Valle del Cauca
- II. Diseñar la metodología tecnológica para validar el uso de Tráfico Agrícola Controlado (TAC) en cultivos de caña de azúcar en el Valle del Cauca
- III. Validar la metodología tecnológica diseñada mediante un caso de estudio de Tráfico Agrícola Controlado (TAC) para agricultura de precisión en caña de azúcar a través de parámetros cuantitativos

1.4. Metodología

El Proceso Unificado Racional (RUP) es una secuencia metodológica de desarrollo de software que junto con el Lenguaje Unificado de Modelado (UML), constituye la metodología estándar más utilizada para el análisis, implementación y documentación de sistemas orientados a objetos. Para la evaluación de TAC en caña de azúcar usando tecnología *RTK*—investigación objetivo del presente estudio—es posible adoptar esta metodología, considerando su enfoque de calidad.

En cuanto a metodologías de desarrollo de software ágiles, se cuenta con la Programación Extrema (XP), la cual se basa en una retroalimentación continua y se utiliza en proyectos con requisitos imprecisos y cambiantes; esta metodología consta de 4 fases: planeación, diseño, codificación y pruebas.

Las labores de cosecha que usan un sistema piloto automático requieren de validaciones tecnológicas y logísticas; por lo tanto, es necesario establecer una definición formal de requerimientos, análisis, diseños e implementaciones del sistema de TAC en cosecha de caña de azúcar con la tecnología *RTK*. Adicional a esto, es indispensable tener una metodología en la que se consideren:

- La importancia del desempeño en la labor operativa.
- El comportamiento de variables—consumo de combustible y paralelismo de trayecto—con relación al uso de las tecnologías y los métodos tradicionales de cosecha.

Dado que los métodos ágiles hacen más explícita la importancia en el manejo del equipo y personas, se consideran como un complemento para las metodologías tradicionales que están más enfocadas en los procesos y la documentación. Con el fin de implementar eficientemente la metodología para validar la cosecha mediante TAC en los procesos de agricultura de precisión para cultivos de caña de azúcar, se propone una variante compuesta de la metodología RUP y XP. La metodología híbrida propuesta (Figura 1) se basa en: una fase de investigación (documentación), dos fases iniciales (planeación e investigación), dos fases iterativas de implementación y pruebas, y una fase final de resultados.

A continuación, se describen las actividades de la estrategia metodológica implementada:

1.4.1. Fase de Investigación:

La fase de investigación se extiende durante todo el proyecto y como resultado se obtienen los documentos necesarios para iniciar la planeación de la metodología. En esta fase se documenta el entorno ambiental de las labores, los componentes tecnológicos asociados a los sistemas de telecomunicaciones como componentes fundamentales para ejecutar TAC en cosecha. Adicionalmente, se hace alusión a las tecnologías y herramientas implicadas y la arquitectura de referencia de los servicios ofrecidos. En esta fase se investigó el procedimiento para la transmisión de señales en el espectro electromagnético y el modo de operación de la maquinaria agrícola con estas señales.



Figura 1. Estrategia metodológica implementada

1.4.2. Fase de Planeación:

En la fase de planeación se define el plan de trabajo a seguir para alcanzar los objetivos propuestos, este plan se revisa periódicamente para ajustarlo a los cambios que se produzcan durante el proceso. Para este proyecto se definieron las metodologías de referencia, las herramientas de telecomunicaciones, los requerimientos de la arquitectura tecnológica y el análisis de estos para soportar las decisiones de implementación.

1.4.3. Fase de Pruebas:

En las fases iterativas de pruebas se verifican los servicios que ofrece el sistema RTK, específicamente cobertura, edad de corrección, error posicional y distancia desde la estación base. Se afina el plan de pruebas, se ejecutan los casos de verificación, se observan los resultados y se obtienen las conclusiones del caso. En este proyecto se definió un plan de pruebas para verificar el funcionamiento de la estación de referencia RTK.

1.4.4. Fase de Implementación:

En las fases iterativas de implementación se realiza la configuración del servicio requerido, se prepara el escenario de la labor proponiendo un ensayo con repeticiones que logre entregar datos de alta confiabilidad como producto de la aleatorización. En esta fase se hizo el diseño de la metodología para la

validación del sistema de TAC con señal *RTK*, se definió la actividad objeto de estudio, se implementaron y validaron los componentes de dicha metodología.

1.4.5. Resultados:

En esta fase se realizan los ajustes finales, se hace la implementación, se entrena al personal y se ejecuta la metodología en el caso de estudio, se realiza monitoreo constante durante la labor comercial de cosecha. En esta fase final se entrega la documentación del proyecto con todas las especificaciones a nivel metodológico. En esta etapa se espera validar principalmente dos variables:

- La cuantificación del consumo de combustible por medio de la obtención de datos que proporciona el sistema de telemetría de la cosechadora. Con esta información se buscan determinar diferencias entre el uso o no uso de TAC para cosecha de caña de azúcar.
- La medición de los errores de desviación con la aplicación del sistema autoguiá. Por medio de Sistemas de Información Geográfica (SIG) como Qgis y softwares estadísticos como R Studio, se busca identificar el impacto del pisoteo en el cultivo.

A través del caso de estudio, el análisis de la información colectada permitirá en gran medida identificar el impacto económico y ambiental de la práctica del uso de TAC, como lo es la disminución de Gases de Efecto Invernadero (GEI) mediante el control y ahorro de combustible; así como la reducción de la degradación del suelo gracias al control en la trayectoria de las cosechadoras de caña, validando las ventajas de las buenas prácticas ambientales en el ámbito agrícola.

Desde el capítulo 3 al capítulo 6, se describe la metodología planteada en el desarrollo de esta tesis.

Marco de Referencia

2.1. Marco conceptual

Con el aumento de los avances tecnológicos surgen diversas soluciones para las problemáticas que se hacen evidentes en el campo. Al aplicar soluciones de índole tecnológica en el ámbito agrícola es posible observar cambios operacionales que van desde la aplicación de agroquímicos en zonas específicas en un cultivo hasta la automatización del volante en la maquinaria agrícola (Zhang et al., 2002). El uso de técnicas de posicionamiento como la *RTK* resulta ser de gran utilidad para las aplicaciones que requieren un nivel de precisión geoposicional, como por ejemplo la cosecha mecanizada.

2.1.1. Global Navigation Satellite System (GNSS)

El Sistema Global de Navegación por Satélite es un grupo de constelaciones satelitales que orbitan la tierra, permite la geolocalización de dispositivos de radiofrecuencia. El *GNSS* se considera estratégico en diversas aplicaciones de la vida moderna: protección civil, defensa, agricultura, construcción, transporte, entre otros. Entre los sistemas *GNSS* se encuentran grupos de satélites tales como el *GPS* (EEUU), el *GLONASS* de Rusia, el *Galileo* de Europa, el *BeiDou* de China y el *QZSS* de Japón (Bacci et al., 2012), tal y como se aprecia en la Figura 2. En agricultura, se utilizan antenas de radio instaladas en la maquinaria agrícola, de esta manera es posible recibir señales satelitales con las cuales se puede digitalizar su posición. Algunas aplicaciones son la fertilización, los monitores de rendimiento, la siembra, el surcado, la fumigación, la cosecha, entre otros. La precisión en la localización depende de la tecnología que se utilice, los errores de posición van desde los 9 m hasta los 2.5 cm (Kingwell & Fuchsichler, 2011). En agricultura se selecciona la tecnología en función del error posicional y la aplicación que se considera ejecutar.

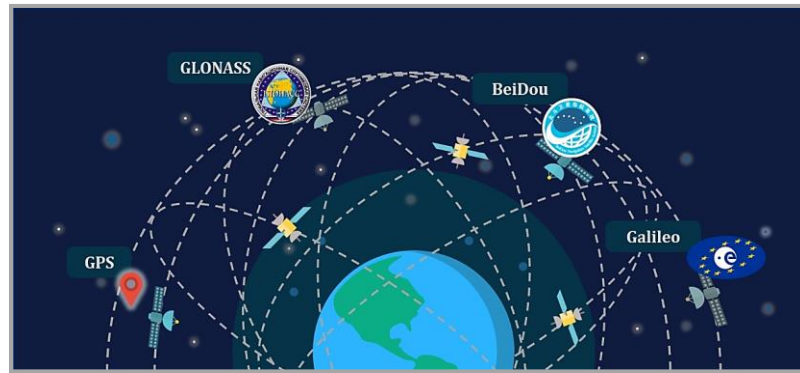


Figura 2. Constelaciones del sistema GNSS

2.1.2. Real Time Kinematic (RTK)

En el mercado existen distintos sistemas de corrección, la diferencia entre estas tecnologías radica en la precisión que requiere para una aplicación específica. Servicios de corrección bajo suscripción como *OmniSTAR*, *RTX*, *StarFire* o *TerraSTAR*, son servicios de posicionamiento precisos que establecen conexión directa desde un satélite geoestacionario hasta el receptor (kit de topografía, tractor, cosechadora, etc.). Estas herramientas proporcionan una precisión hasta cuatro veces menor que con el uso de corrección *RTK*. El sistema de transmisión *RTK*, ilustrado en la Figura 3, consta de un dispositivo conocido como receptor *GNSS* que procesa la información obtenida a partir de una antena multi – constelación. La información procesada se transmite por el espectro electromagnético del *UHF* o vía internet. Los componentes generalmente se instalan en un gabinete y se conectan a una fuente de alimentación continua. La posición de la estación base es fija, de modo que sus correcciones proporcionan una precisión de posicionamiento absoluta y relativa de 2,5 cm durante años. Como las estaciones base fijas proporcionan datos de corrección en un formato dedicado, en su mayoría están vinculados a una variedad limitada de sistemas de pilotos automáticos que aceptan su formato de corrección. (Muhr & Noack, 2010).

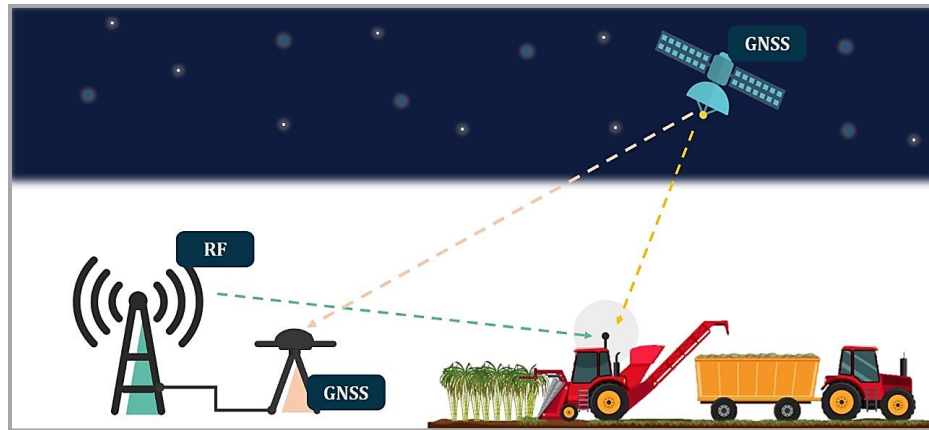


Figura 3. Ilustración del sistema RTK

2.1.3. Piloto automático agrícola (*Autosteering*)

El sistema *autosteering* o piloto automático es una herramienta que se usa en la automatización de labores agrícolas. Consiste en la intervención del volante o dirección del vehículo y se gobierna por medio de dispositivos electrónicos. Los elementos que lo componen se presentan en la Figura 4 y consisten en: una antena GNSS que se ubica generalmente en el techo del vehículo (con el fin de obtener la mayor visibilidad de las señales satelitales), un navegador que procesa las señales obtenidas por la antena GNSS, una antena de radiofrecuencia *UHF* o internet para la obtención de mensajes *RTK*, un grupo de electroválvulas hidráulicas para controlar el flujo hidráulico hacia las ruedas, un giroscopio para identificar el ángulo de giro de las ruedas y una pantalla en cabina que se desempeña como Interfaz Humano – Máquina (*HMI*) para la carga, ejecución y verificación de proyectos de campo, además de las configuraciones que demanda el sistema de *Autosteering* (United States Patent N.º US20090099730A1, 2009). Con el uso de la herramienta del piloto automático agrícola se automatiza el desplazamiento de las ruedas bien sea para líneas de surcado, pivotes, curvas de nivel o proyectos de libre diseño. Al contar con recepción de señal *RTK*, es posible obtener un error de desplazamiento de las líneas teóricas con respecto a las líneas reales en campo de aproximadamente 2.5 cm (Kingwell & Fuchsbichler, 2011).

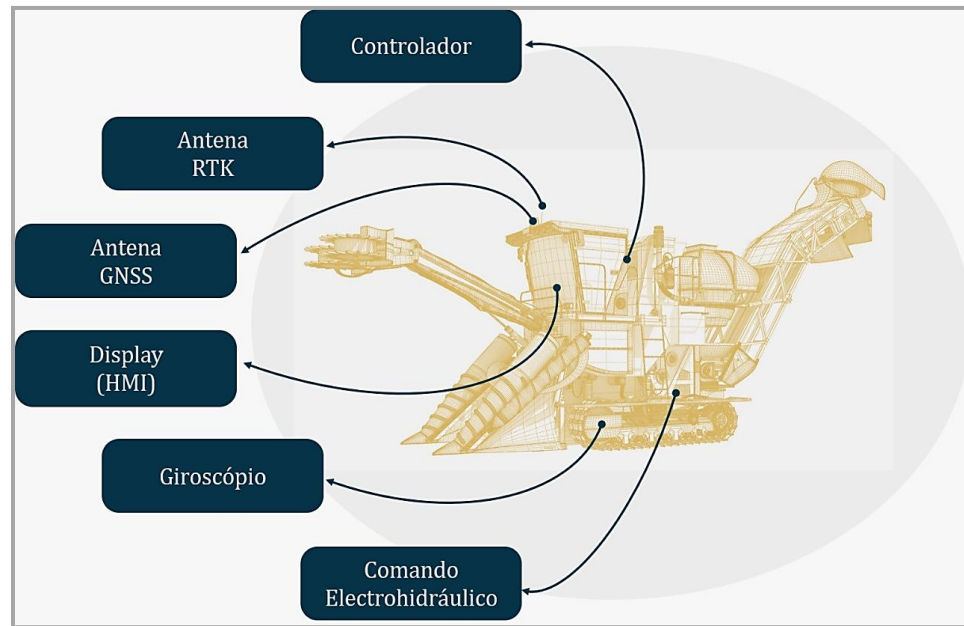


Figura 4. Componentes de sistema autoguía.

2.1.4. Tráfico Agrícola Controlado (TAC)

Se le conoce TAC a la técnica para establecer regímenes en las trayectorias de la maquinaria en campo usando dispositivos de posicionamiento satelital. Incorpora análisis geo – estadísticos y sistemas de AP para controlar el desplazamiento de cada vehículo agrícola. El TAC reduce el efecto de compactación ya que se obliga al *Autosteering* a desplazarse por espacios definidos previamente como zonas traficables, de esta manera se identifica y clasifica el cultivo con zonas traficables y zonas no traficables. Se estima que el uso de TAC en las labores agrícolas puede mejorar variables del suelo tales como la densidad aparente, el volumen de poros y la conductividad hidráulica no saturada (Guenette & Hernandez-Ramirez, 2018).

2.2. Marco legal

En el uso de sistemas de telecomunicaciones se requiere la transmisión de información de manera inalámbrica por medio del espectro electromagnético. La disposición del espectro normalmente es regulada por entidades gubernamentales en todos los países, esto con el fin de mantener aislado cada canal de información y garantizar los intereses de usuarios que pueden ser de tipo público, privado e incluso militar. Adicionalmente, para labores que requieran la ocupación del espacio aéreo en la agricultura—como el uso de drones o UAV's —también existe un organismo regulatorio.

La implementación de AP demanda el uso de algunos servicios gubernamentales, por lo tanto, es preciso cumplir con las normatividades de uso del espectro y del espacio aéreo para realizar las operaciones de precisión en campo, dentro de los parámetros legales.

2.2.1. Uso del espectro electromagnético

El sistema *RTK* transmite señales de corrección de posicionamiento espacial por medio de dispositivos de comunicación que hacen uso del espectro electromagnético. La estación que hace parte del objeto de estudio, emite señales con un radio que puede hacer uso del rango de frecuencias entre 430 y 473 MHz (Trimble, 2019). En Colombia existen restricciones con el uso de ciertos canales que están dedicados a uso privativo aerocivil o militar. Por lo que para los canales disponibles que se asignan a radio aficionados o usuarios corporativos se debe participar en una licitación de la Agencia Nacional del Espectro (ANE) denominada selección objetiva.

Mediante la ANE, el Ministerio de Comunicaciones realiza la asignación de espectro o selección objetiva en definidos periodos del año, donde se permite la participación de usuarios interesados en el uso de frecuencias en el rango de 300 a 463.5 MHz, exceptuando el rango 452.5 a 459.4 MHz por razones de uso gubernamental (Mintic, 2019). Una vez diligenciado el formato para la participación en la selección objetiva, la ANE adjunta a la entidad a una lista de usuarios participantes. En un periodo de tiempo establecido por la entidad gubernamental, se emite la resolución que otorga el o las frecuencias—por las que se han participado—según disponibilidad.

La estación *RTK* seleccionada para el ensayo del caso de estudio cuenta con los permisos gubernamentales como se ilustra en la Figura 5, por lo cual es posible realizar labores de AP dentro de los parámetros establecidos por la ley.

2.2.2. Uso del espacio aéreo

Con la incorporación de nuevas tecnologías al sector agrícola, surgen normativas gubernamentales que regulan su uso. En el caso de los Vehículos Aéreos no Tripulados (*UAV*) que se usan para la toma de fotografías de los cultivos de caña de azúcar, la Aeronáutica Civil establece bajo la resolución número 04201 del 27 de diciembre de 2018, los reglamentos aeronáuticos para la operación de sistemas de aeronaves no tripuladas (Aerocivil, 2018).

La resolución incluye los conceptos y abreviaturas que se usan en el oficio de la operación de aeronaves tripuladas y no tripuladas. Adicionalmente, se clasifican de acuerdo con el riesgo operacional las operaciones con *UAV*. Dentro de la clasificación

se encuentran tres clases: *i)* Clase A (abierta), *ii)* Clase B (regulada) y *iii)* Clase C (certificada - RPAS).

APROBADAS para asignación de frecuencias.

Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
Edificio Murillo Toro, Carrera 8a, entre calles 12A y 12B
Código Postal: 111711 - Bogotá, Colombia
T: +57 (1) 3443460 Fax: 57 (1) 344 2248
www.mintic.gov.co

GOBIERNO DE COLOMBIA
MINTIC

No.	NIT	SOLICITANTE: EVALUADA COMO "APROBADA PARA ASIGNACION"
1	800222177	A Y A RADIOCOMUNICACIONES S.A.S.
2	900765895	ACYONEX S.A.S.
3	860011268	AMCOVIT LTDA
4	800232656	ASOCIACION DE PROPIETARIOS DE VEHICULOS DE SERVICIO PUBLICO DEL META ASPROVESPULMETA S.A.
5	900201181	ASOOLIVOS ASDH ONG
6	860051356	ATLANTA CIA. DE VIGILANCIA PRIVADA LTDA
7	830024478	AVIZOR SEGURIDAD LTDA
8	901147708	CAR INDUSTRIA LOGISTICA SAS
9	890312562	CENTRO DE INVESTIGACION DE LA CAÑA DE AZUCAR DE COLOMBIA-CENICANA
10	900951033	CLINICA CRISTO REY CALI SAS
11	800156044	COMPAÑIA DE PUERTOS ASOCIADOS S.A "COMPAS S.A"
12	830051021	COMPAÑIA DE VIGILANCIA CENTRO EMPRESARIAL DE SEGURIDAD PRIVADA SCANNER LTDA
13	891502104	COMPAÑIA DE VIGILANCIA COVISUR DE COLOMBIA LTDA.

Figura 5. Asignación de espectro (Mintic, 2019.).

- **Clase A (abierta):** En esta clasificación se encuentra la operación de UAV con un peso entre 250 g y 25 Kg (Aerocivil, 2018).
- **Clase B (regulada):** Son clase B todas aquellas aeronaves que supere los 25 Kg y hasta los 150 Kg. Este grupo de UAV requiere de autorización previa de la Aeronáutica Civil para su operación debido a que representan un riesgo mientras opera en el espacio aéreo (*RESL. N° 04201 DIC 27 de 2018.pdf*, s. f.).
- **Clase C (Certificada - RPAS):** Los Sistemas Aéreos Pilotados Remotamente (RPAS) hacen parte de la clase C si superan los 150 Kg. Para el espacio aéreo perteneciente al territorio nacional, esta clase no está permitida, no obstante, La Aeronáutica Civil se reserva la posibilidad de emitir permisos para entidades privadas reconocidas e instituciones gubernamentales, con fines

científicos, de innovación y desarrollo (*RESL. N° 04201 DIC 27 de 2018.pdf*, s. f.).

Según la clasificación establecida anteriormente, se puede afirmar que los UAV que se utilizan para la digitalización de líneas de surcado en el cultivo de caña de azúcar pertenecen a la Clase A. Los dispositivos aéreos que se usan en labores de fotografía aérea para cosecha se componen de piezas que no superan los 25 Kg, esto se debe a que no se requiere en la actividad el transporte de cargas adicionales como agroquímicos o control de plagas.

La resolución de la Aeronáutica Civil otorga a las autoridades competentes la potestad de tomar medidas judiciales cuando la aeronave represente un riesgo inminente para el colectivo, así como para el ingreso no autorizado a zonas prohibidas del espacio aéreo. Las operaciones que se realizan con UAV para agricultura se ejecutan bajo las normativas de las autoridades aeroespaciales para el desempeño de las labores de AP de manera responsable.

2.3. Estado del Arte

2.3.1. Uso del tráfico agrícola controlado a nivel internacional

Caso de estudio: Central Valley, CA.

La práctica en el uso de TAC va más allá de la aplicación en caña de azúcar. Se ha aplicado ampliamente en distintos cultivos a nivel internacional. En Central Valley, (California, US) se llevaron a cabo evaluaciones para determinar las ventajas del uso del TAC. Según (Mitchell et al., 2016) el TAC es un sistema de gestión del tráfico que combina el tráfico de las ruedas con las huellas de las ruedas más pequeñas dentro de un campo para zonas de crecimiento de cultivos que se mantienen separadas de las zonas de tráfico (Kingwell y Fuchsbichler, 2011; Gasso et al., 2013, 2014). El trabajo en el Central Valley fue uno de los primeros trabajos de investigación y desarrollo del TAC que se ha expandido en varias áreas del mundo en los últimos años (Tullberg et al., 2007). Su observación de que "no hay necesidad de labranza a menos que sea para corregir un problema que usted ha creado", continúa siendo una guía importante para la investigación y el desarrollo de sistemas de labranza y agricultura de conservación en Central Valley.

Validación de ahorro de combustible usando TAC, China.

En el norte de China, se validó el ahorro de combustible para maquinaria mediana y pequeña en cultivos de maíz, determinando que el uso de esta metodología generaba un impacto económico significativo. (Chen & Yang,

2015) afirman que el sistema de tráfico controlado es un sistema valioso para resolver el problema de la compactación del suelo, en el que las áreas de cultivo y los carriles de tráfico están permanentemente separados para proporcionar condiciones óptimas para el crecimiento del cultivo (sin tráfico) y la tracción (compactada) (Gasso et al., 2013). Varios investigadores, incluidos Chamen et al., Han demostrado las penalidades de la compactación del tráfico de ruedas y los beneficios del tráfico controlado. Entre todos los beneficios, el ahorro de energía fue uno de los principales objetivos del sistema de tráfico controlado. Cooper y col. (1969) informaron una economía energética indirecta debido a la menor necesidad de labranza profunda en el sistema de tráfico controlado. Campbell et al. (1986) informaron una reducción del 14% en el consumo de energía de siembra de cebada en el sistema de tráfico controlado. Williford (1980) señaló que el aumento de energía para la labranza posterior después de la compactación del suelo casi equivalía a la energía consumida en la compactación del suelo inducida por los neumáticos. Tullberg (2000) demostró que el tráfico controlado redujo el tiro en más del 30% y aumentó la eficiencia de la operación. Se analizó el consumo de combustible para la siembra directa de maíz durante el tiempo de experimento. Del mismo modo, se observó un consumo de combustible significativamente menor usando TAC, en comparación con la labor tradicional en dos años ($P < 0.05$). En comparación con la labor tradicional, el TAC redujo el consumo de combustible en un 28.5% y 17.0%, respectivamente (Chen & Yang, 2015).

Validación del rendimiento y compactación para cosecha de caña de azúcar, Brasil.

En Brasil, se puso a prueba la metodología de TAC utilizando distintos espaciamientos entre hileras para observar el efecto de uso sobre la compactación y el rendimiento del cultivo de caña de azúcar. Independientemente del tratamiento, se encontraron diferencias en las propiedades físicas del suelo entre los sitios de muestreo R, IRC y S. Para SRCT (Tráfico Controlado en Surco Sencillo, por sus siglas en inglés), se encontró un aumento de 17.9% de biomasa seca de raíz, mientras que se produjo un aumento de 18.5% para el tratamiento DRCT (Tráfico Controlado en Doble Espaciamiento, por sus siglas en inglés), así como una mayor densidad, longitud, volumen y área raíz en comparación con la ausencia de TAC. El tráfico controlado permitió ganancias de rendimiento de la caña de azúcar de 8.2 y 10.3 Mg ha⁻¹ para SRCT en la tercera y cuarta cosecha, y 18.8 y 15.7 Mg ha⁻¹ para DRCT en la misma secuencia de cosecha. Estos hallazgos sugieren que el tráfico controlado a través del sistema piloto automático asociado con el espaciado de doble fila minimiza la compactación del suelo y preserva las

condiciones físicas del suelo para las raíces, así como también aumenta el rendimiento de la caña de azúcar (Aguilera Esteban et al., 2019).

2.3.2. Estudios del uso de AP a nivel nacional.

El uso de AP a nivel nacional se encuentra enmarcado fundamentalmente en prácticas de monitoreo del rendimiento de caña, caracterizando los cultivos según la densidad de la caña de azúcar. Molin, 2016, afirma que el uso de sistemas tecnológicos aplicados en agricultura se concentra especialmente en el sector azucarero del Valle del Cauca. La sociedad, conformada por 13 ingenios, se especializa en prácticas de muestreo de suelos, fertilización en tasa constante/variada y mapeo de rendimiento.

En el Valle del Cauca se realizan prácticas con el uso de piloto automático para labores de surcado y cosecha, sin embargo, no existe documentación que ratifique los beneficios a partir de estas prácticas. El TAC es una metodología que empieza a incorporarse en las labores comerciales de caña de azúcar.

En vista de que no existe investigación referente a la validación tecnológica para las labores de TAC con *RTK*, se consideró pertinente incursionar en el análisis de variables rendimiento por medio de un caso de estudio. Para el consumo de combustible se hizo referencia a la investigación planteada por Chen & Yang en China. En cuanto al efecto de compactación, se tomó como punto de referencia los estudios que se realizaron en Brasil por Esteban Aguilera y otros.

El estudio planteado por Kingwell y Fuchsbichler, ilustró los beneficios del uso del TAC en las labores del campo, en su caso particular, para el cultivo de avena. Se tomó como referencia el análisis de variables que se pueden afectar con el uso del piloto, en este caso el combustible, el cual mediante análisis estadístico manifiesta un ahorro en el consumo, consecuentemente, la disminución en los costos se ve reflejada en el análisis de esta variable dentro del caso de estudio.

(Chen & Yang, 2015), diseñaron una maquina trasplantadora de arroz, donde evaluaron el error de trayectoria para analizar el efecto del piloto automático sobre el cultivo. El efecto de compactación es un inconveniente para la labor de cosecha de caña de azúcar, esto motivó la idea de tomar los estudios realizados por Chen y Yang e incorporarlos en el análisis de la geolocalización de las cosechadoras de caña de azúcar a través de los surcos.

Investigación

3.1. Sistema de transmisión *RTK*

El sistema de transmisión *RTK* es una herramienta tecnológica que se usa en diferentes áreas: topografía, ingeniería civil, aeronáutica, agricultura, entre otras. En las labores del campo—específicamente en agricultura—existen actividades que requieren de alta precisión geo posicional, tales como el surcado y la cosecha. La maquinaria agrícola equipada con piloto automático permite automatizar la operación del volante mediante el control de la trayectoria, para lograr alta precisión, el tractor o cosechadora requiere de la señal *RTK*.

El equipamiento del sistema *RTK* se instala según la necesidad del usuario, para labores que se ejecutan una sola vez, su instalación es del tipo móvil, de fácil instalación y desarme. Para proyectos que requieren repetitividad en el tiempo—como los ciclos de la agricultura—se instala una estación fija o permanente, de tal manera que sea posible la continuidad en la precisión y exactitud de la señal. La diferencia entre estas dos configuraciones radica en su infraestructura; mientras la estación móvil solo requiere de un trípode para el ensamblaje, la estación permanente requiere de construcciones civiles. De forma general, un sistema *RTK* emplea un gabinete o contenedor sellado para los dispositivos electrónicos, un trípode permanente para la antena *GNSS* y un medio efectivo para alcance en transmisiones de radio, como una torre de comunicaciones.

Los componentes que conforman el sistema de comunicación *RTK* se describen en las siguientes subsecciones.

3.3.1. Antena *GNSS*

La antena *GNSS* es el dispositivo que permite la obtención de señales provenientes de los satélites de posicionamiento *GNSS*. Existen distintos tipos, tal como se ilustra en la Figura 6. Una estación de referencia transmisora de *RTK* requiere de una antena con una *plataforma grande*, esto es con el fin de obtener la mayor cantidad de señales provenientes del espacio. Es importante la adquisición de la mayor cantidad de señales satelitales posibles, debido a que la redundancia aumenta la confiabilidad de la posición.

Platform	Applications	Bands*	Instant. Bandwidth*	Gain Pattern	Multipath Rejection*	Interference Rejection*	Phase Center Stability**	Size	Weight	Cost
<i>Large</i>	Geodetic, ships, etc.	2 or more	> 40 MHz	Very strict*	High	High	Good	Diameter > 15 cm	Heavy*	High*
<i>Medium</i>	Car, truck, train, aircraft	1-2	> 10 MHz	Somewhat strict*	Medium	Medium	Fair	Diameter > 3 cm	Medium	Medium
<i>Small</i>	Body-wearable, laptop	1	> 2 MHz	Not strict	Low	Low	Poor	Small and conformal	Light	Low
<i>Handheld</i>	Cellphone, GNSS receiver	1	> 2 MHz	Ignored	None	None	Very poor	Very small	Very light	Very low

* Large changes in a few years are expected. ** Some will have serious degradation when bands and bandwidth are expanded.

Figura 6. Tipos de antenas GNSS (Wang, 2012)

La maquinaria agrícola—como equipos de surcado y cosechadoras—con sistema autoguía, contienen en su equipamiento una antena *GNSS* con el fin de incluir su propia ubicación geográfica. Este dispositivo generalmente es de *plataforma mediana*. La diferencia entre la antena de la estación de referencia y la del vehículo, radica en que la primera recibe toda la información necesaria para ser procesada y posteriormente transmitida; la segunda solo se utiliza para su propia localización en el espacio. En la Figura 7 se ilustran los dos tipos de antena, donde se aprecia la diferencia en sus dimensiones.



Figura 7. Antena GNSS grande (estación base) y mediana (vehículo).

3.3.2. Receptor GNSS

El receptor *GNSS* es el componente más importante de una estación *RTK*, tiene como función el procesamiento de información satelital de posicionamiento que se adquiere por medio de la antena *GNSS*. Los datos que se obtienen provienen de las distintas constelaciones que se logran observar desde la

ubicación del receptor, para el caso particular del desarrollo de este documento, *GPS* y *GLONASS*. Para la observación constante de las señales satelitales, el receptor consta de un completo sistema electrónico, el cual se encuentra descrito en la Figura 8.

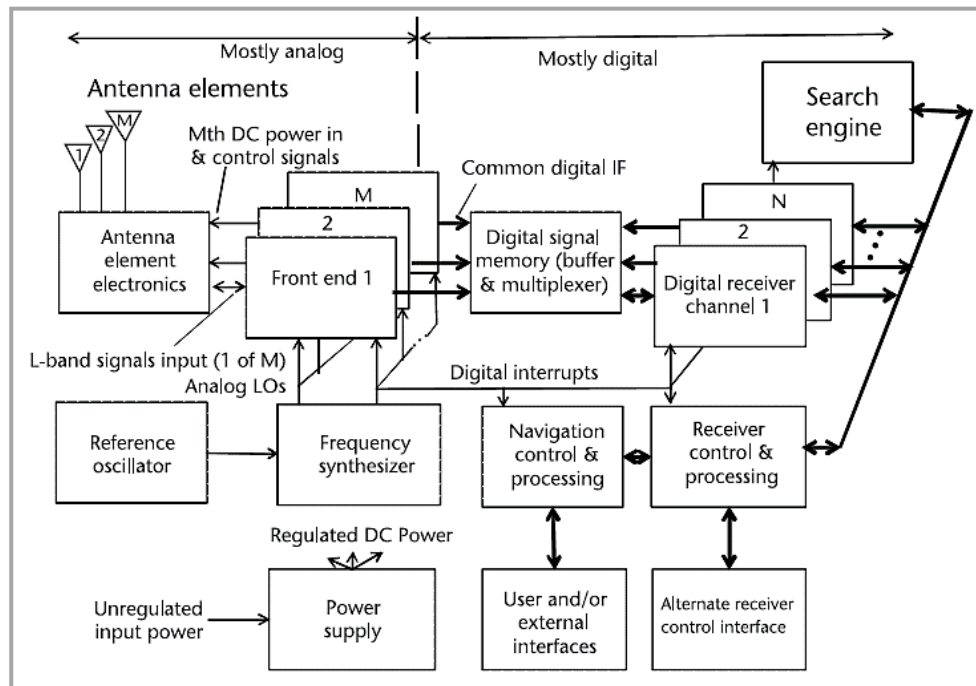


Figura 8. Diagrama de bloques de un receptor GNSS genérico (Kaplan & Hegarty, 2017).

Normalmente un receptor se compone de uno o más elementos de antena—incluyendo componentes electrónicos asociados a la antena—más de un terminal frontal, múltiples canales de recepción digitales—incluido un motor de búsqueda—, una función de control y procesamiento del receptor, una función de control y procesamiento de navegación, y otras funciones esenciales como el oscilador de referencia, el sintetizador de frecuencia, la fuente de alimentación con reguladores de corriente continua, las interfaces apropiadas de usuario y/o externas—regularmente puertos RS-232 y RJ45—(Kaplan & Hegarty, 2017). Por lo general, el receptor consta de una batería interna recargable que proporciona energía de respaldo en caso de que exista un corte inesperado de la fuente principal de alimentación. En la Tabla I, se describen en detalle cada uno de los componentes del receptor GNSS.

Tabla I Descripción de componentes del receptor GNSS (Kaplan & Hegarty, 2017)

Componente del receptor	Descripción
Elementos de antena y electrónica	Los elementos que componen la antena convierten las señales <i>GNSS</i> —incluyendo el ruido—en valores en función del voltaje, esta operación se ejecuta en simultánea con distintas señales debido a la cantidad de canales por los cuales transmite un satélite (banda estrecha M, banda L, entre otros). Internamente el sistema dispone de divisores de tensión para compatibilizar la impedancia de carga de la antena, además de amplificadores de bajo ruido para mitigar pérdidas en el cableado de la antena.
Interfaz	La interfaz proporciona un acondicionamiento de señal que consiste en el filtrado de paso de banda analógico, amplificación, filtrado antialiasing y conversión descendente a una frecuencia intermedia común (IF) o en una señal de banda base en fase (I) y en cuadratura (Q), seguida de un conversor analógico-digital (ADC). Por seguridad, el sistema dispone generalmente de una interfaz por cada frecuencia de señal <i>GNSS</i> .
Memoria digital (Buffer y multiplexor) y canales receptores digitales	La memoria digital—buffer y multiplexor—almacena bloques de datos en tiempo real que son procesados por los canales del receptor digital. Normalmente, la interfaz escribe un bloque de datos digitales, mientras que el bloque anterior lo leen tantos canales del receptor N como estén asignados a diferentes satélites en esa misma frecuencia portadora. Cada canal receptor digital realiza los procesos de eliminación de código y portadora más rápidos. Cada canal detecta y rastrea una señal satelital bajo el control del receptor y la dirección de procesamiento seleccionando el flujo de datos de muestreo.
Control del receptor y procesamiento de navegación	El control y procesamiento proporciona apoyo de navegación—cuando está disponible—a los canales del receptor digital para acelerar el proceso de adquisición/readquisición y proporcionar solidez al proceso de seguimiento. Además, extrae mediciones y datos de mensajes de navegación y los pasa a la función de control y procesamiento de navegación que los incorpora para producir posición, velocidad y tiempo (<i>PVT</i>) para la aplicación prevista.

Oscilador de referencia y sintetizador de frecuencia	El oscilador de referencia en combinación con el sintetizador de frecuencia admite la conversión descendente de la señal analógica, el tiempo de muestra para los procesos de conversión de analógico-digital y la sincronización de tiempo del procesamiento de la señal digital con respecto a las señales en tiempo real mediante interrupciones de tiempo discretas a los procesos digitales.
Interfaces de usuario y/o externas	Estos sistemas adaptan el receptor a su entorno operativo, incluye una Interfaz Humano-Máquina o <i>HMI</i> . Los periféricos externos incluyen conexiones electrónicas estándar para sistemas abiertos o interfaces no estándar para sistemas cerrados patentados. Estas interfaces proporcionan información PVT en tiempo real a estos sistemas y, a veces, información de control y datos.
Interfaz de control de receptor alternativo	Si el receptor funciona como el sistema de aumentación para otro sistema de navegación, entonces la interfaz de control alternativa proporciona acceso a los datos observables en tiempo real y responde al control externo inteligente. La versión más sofisticada de este proceso de integración deshabilitaría el control y procesamiento de navegación y las funciones de usuario y/o interfaces externas.
Suministro de energía	El suministro de energía soporta y regula todas las funciones operativas del receptor. Al tratarse de un dispositivo que observa de manera continua señales satelitales, generalmente se realizan mediciones de forma ininterrumpida, por tal razón el suministro de energía cuenta con batería interna para suplir al sistema en caso de cortes inesperados en la energía.

Entre las funciones principales del receptor *GNSS* en un sistema *RTK* se tienen:

- Observación de señales satelitales provenientes de las constelaciones *GPS* y *GLONASS* principalmente.
- Generación de archivos con formatos compatibles para el procesamiento de levantamientos de topografía, fotografía aérea con drones, entre otros.
- Generación de paquetes de información en formato *CMR+* (*Compact Measurement Record*) por parte del receptor *GNSS*, los cuales se envían mediante un sistema de transmisión como el radio *UHF* o el módem *GSM* para el servicio de la maquinaria agrícola con piloto automático equipado. Existen otros formatos de transmisión, como es el *RTCM 3x* (*Radio Technical Commission for Maritime Services*), el cual se usa en

distintas aplicaciones topográficas. Sin embargo, para fines de compatibilidad entre marcas de receptor y maquinaria agrícola se utiliza *CMR+*.

En la Figura 9 se describen algunos de los receptores *GNSS* más usados en el mercado local.



Figura 9. Receptores *GNSS*. De izquierda a derecha: Trimble Alloy, Navcom SF-3050 y Topcon Net G5.

3.3.3. Sistema de transmisión de información

Una vez se ha recibido y procesado la información satelital, el receptor dispone de esta para la transmisión en tiempo real de paquetes. Los datos—en formato *CMR+*—pasan por medio de los periféricos externos como el *RS-232* y el *Ethernet* hacia un medio de comunicación tipo broadcast. Los protocolos *RS-232* y *Ethernet* son los más usados para la transmisión de *RTK*.

El protocolo *Ethernet* se usa comúnmente en aplicaciones donde se requiere adaptar un módem o *router* para el envío de los datos por la red celular *GSM*. Una de las ventajas de esta solución, es que se facilita el diagnóstico y mantenimiento remoto de las estaciones de referencia, logrando acceso desde cualquier dispositivo con internet: un computador, una tablet o un teléfono móvil. Es preciso considerar, que la comunicación de este tipo depende de la cobertura de red del operador celular, es decir, se requiere de una cobertura constante de una compañía tercera que ofrece servicios de comunicaciones móviles. Para el caso de la agricultura del valle geográfico del río Cauca, la cobertura de red celular presenta intermitencias en el área rural tal como se ilustra en la Figura 10. La inestabilidad en la comunicación ocasiona la discontinuidad de las labores de precisión en el campo, generando

desconexiones inesperadas durante el proceso de operación. La Figura 10 muestra la simulación de propagación de la red 3G del operador Claro en la mayor parte del valle geográfico del río Cauca, donde se percibe que a los extremos de las cordilleras—lugares donde también se cultiva la caña de azúcar—existe poca cobertura, lo cual se ilustra con colores azul y blanco.

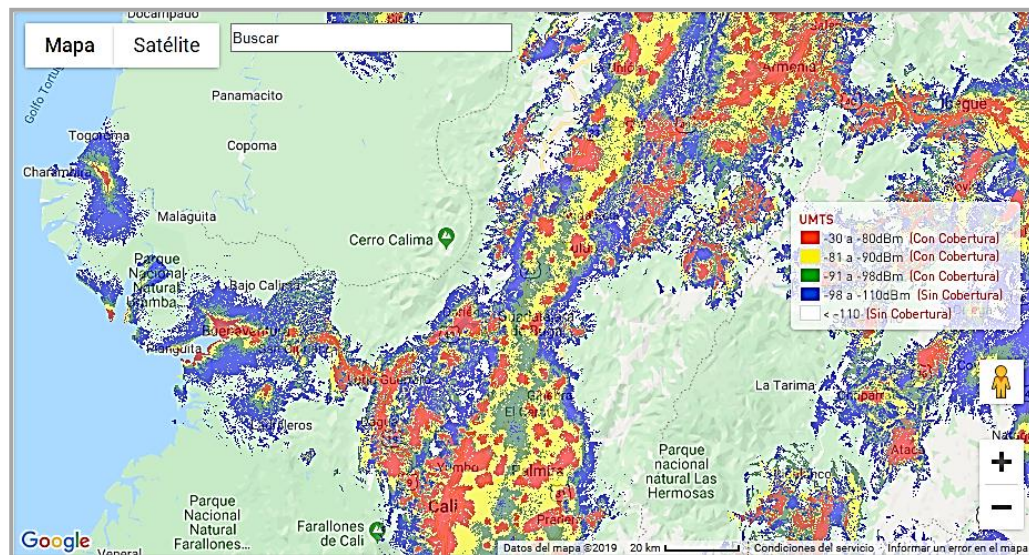


Figura 10. Cobertura de red de Claro en el valle geográfico del río Cauca (Claro, 2019).

El sector azucarero colombiano se caracteriza por irregularidades geográficas demarcadas y abundante masa foliar, provocando que las comunicaciones sean un desafío. Para el acceso a zonas donde la cobertura es débil o nula, se considera la implementación de un sistema de comunicación que no dependa de operadores de red.

Como se mencionó anteriormente, dispositivos de transmisión como el radio *UHF* es una alternativa para la transmisión de paquetes *CMR+*. Una de las ventajas sobresalientes del radio *UHF* es que solo depende de la información que proporciona el receptor *GNSS* y de componentes de funcionamiento, como lo son cables de baja pérdida, antenas de alta ganancia, protecciones contra descargas eléctricas, entre otros. Cabe aclarar que es fundamental el criterio de ubicación para instalar cada uno de los transmisores de *UHF*. La geografía y la vegetación se consideran barreras para la comunicación, por lo tanto, se deben superar con elementos como torres de riendas y torres auto soportadas para brindar una altura adecuada a la antena de *UHF*.

Durante el estudio para la instalación de estaciones *RTK* con sistemas de transmisión *UHF*, se usan simuladores de propagación como el que se ilustra en la Figura 11, el cual, se basa en modelos digitales de elevación y terreno para determinar las áreas de cobertura. Esta información es importante para decidir la ubicación en donde se llevará a cabo la instalación de la estación, de tal forma que sea posible la mayor cobertura de señal en el campo, a través de una ubicación óptima.

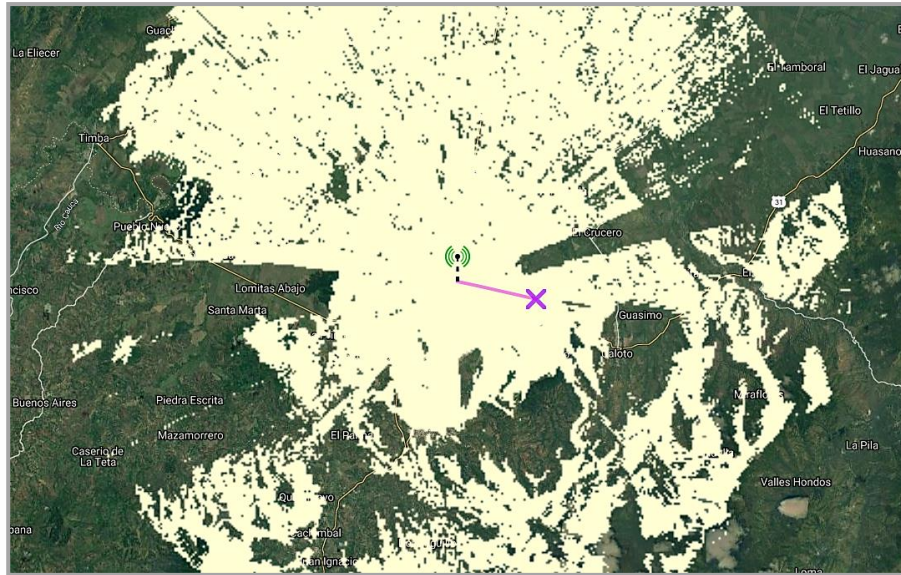


Figura 11. Simulador de propagación de señal UHF en 450 MHz (HeyWhatsThat WISP, 2019).

En la Figura 11 se muestra una estación *GNSS* que transmite mediante *UHF* información de *RTK*. En la ilustración se pueden observar:

- Un espectro color amarillo claro que representa la cobertura de la señal en la zona.
- Espacios sin color en el mapa que se interpretan como obstaculización de señal.

Para la reducción de zonas con baja o nula cobertura de señal se ubican puntos en lugares altos o despejados. Además, debe tenerse en cuenta un parámetro denominado zona de Fresnel. Este, consiste en el margen que se debe considerar para lograr una comunicación óptima entre el transmisor y el receptor. Es imperativo el análisis de la zona de Fresnel, ya que las comunicaciones se pueden ver afectadas por un fenómeno denominado *difracción de filo de cuchilla* (Saunders & Aragón-Zavala, 2007). Este efecto se produce cuando una barrera sólida impide el paso de energía a través de ella,

en sus extremos los rayos tratan de emerger, produciendo un paso de señal difractado.

El volumen que conforma la elipse de la zona de Fresnel—descrito en la Figura 12—no debe superar cierto porcentaje, de lo contrario la comunicación entre el transmisor y el receptor se verá afectada. Este valor porcentual, que depende en gran medida del factor k , curvatura de la tierra, debe ser máximo de ~40% (Saunders & Aragón-Zavala, 2007).

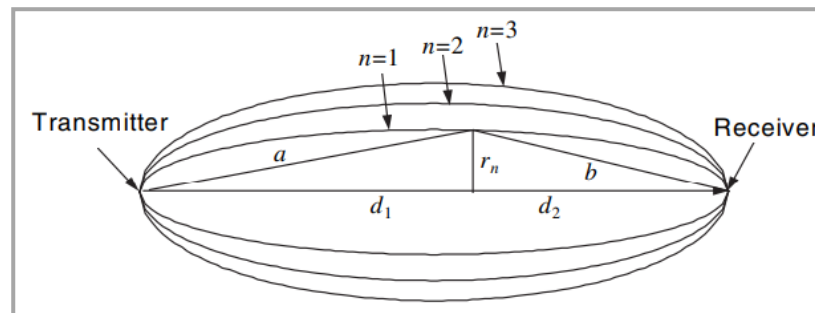


Figura 12. Descripción geométrica de la zona de Fresnel (Saunders & Aragón-Zavala, 2007).

Para hallar la zona de Fresnel efectiva entre dos puntos de comunicación se utiliza la siguiente fórmula:

$$r_n \approx \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (1)$$

Donde:

r_n = Radio de la zona de Fresnel

d_1 = Distancia desde el transmisor al centro del elipsoide en metros.

d_2 = Distancia desde el centro del elipsoide al receptor en metros.

λ = Longitud de onda de la señal transmitida en metros.

3.2. Documentación de las aplicaciones de RTK en el cultivo de caña de azúcar

Actualmente en el sector agroindustrial de la caña de azúcar de Colombia, se realizan labores que emplean una amplia variedad de métodos, desde los manuales tradicionales hasta los que aplican la tecnología como alternativa para la tecnificación del trabajo. No se puede desligar por completo la mano de obra de las labores que incluyen automatización debido a que muchas de las mismas precisan del juicio que se le atribuye a la intervención humana. Sin embargo, muchas de las actividades agrícolas que se llevan a cabo pueden ser atribuidas a la electrónica, a los sistemas de información geográfica o a la inteligencia artificial como herramientas que permiten al

operario enfocarse en trabajos que requieren de gran destreza, como estar al pendiente de las herramientas hidráulicas de un tractor o el estado de las funciones de cosecha.

En esta sección, se describirán las labores que se desempeñan con *RTK* en todo el ciclo del cultivo de la caña de azúcar con el propósito de mejorar condiciones como el aprovechamiento efectivo del suelo, aumento del rendimiento operativo y reducción del pisoteo.

3.3.1. Nivelación *GNSS*

La nivelación hace parte de las labores de adecuación de suelos para el cultivo de la caña de azúcar. Permite generar pendientes para drenajes por medio de cortes y rellenos del suelo. Tradicionalmente, esta actividad se realizaba por medio de maquinaria amarilla como bulldozers que incluían una planeación previa, además de labores topográficas.

Conforme a la evolución tecnológica, se incorpora la tecnología láser a la labor. La nivelación laser consiste en la ubicación de un transmisor que emite un haz de luz, se requiere que el dispositivo se encuentre en un lugar plano contiguo a la zona que se pretende nivelar. El dispositivo receptor del haz de luz se instala en el implemento del tractor denominado escrepa o traílla, el cual se encarga de coleccionar los excesos de suelo y a su vez descargarlos en los lugares donde carezca del mismo para generar la pendiente esperada. Este dispositivo se interconecta con el sistema electrohidráulico del tractor y la escrepa, de tal forma que la misma pueda cambiar su altura con el fin de localizar continuamente el haz de luz. De esta forma, la nivelación se realiza considerando el punto de referencia que genera el transmisor con el haz de luz.

En la actualidad, se incorpora la tecnología *GNSS* para reemplazar el sistema de nivelación laser. En lugar de disponer de un transmisor de luz, se utiliza una estación de *RTK* que transmite correcciones en los ejes *X*, *Y*, y *Z*, siendo este último el que representa la altura de la posición. La traílla se equipa con una antena *GNSS* en reemplazo del receptor laser tradicional como se ilustra en la Figura 13, de tal forma que el sistema puede conocer la altura actual.



Figura 13. Tractores realizando labores de nivelación con GNSS (Topcon, 2015).

El sistema de *RTK* transmite constantemente datos de posicionamiento, a su vez el receptor del tractor compara esta información con la posición y altura de la escarpa según la antena *GNSS*. Por medio del sistema electrohidráulico, el implemento sube o baja su posición para lograr la pendiente planeada. Es preciso tener en cuenta que el sistema *RTK* pierde precisión a medida que la distancia entre la base y el receptor aumenta, el error se refleja en mayores proporciones en la medición de la altura. Por esta razón, es imperativo que la estación base se encuentre a menos de 3 km de distancia de la zona donde se pretende realizar la labor de nivelación.

3.3.2. Fotografía aérea con UAV

Las labores que se realizan en el sector agroindustrial de la caña incluyen el uso de AP en algunas actividades del campo. Algunos cultivadores disponen de cosechadoras de caña con sistema piloto automático para ejecutar la labor con alta precisión conectados a la señal *RTK*. No obstante, al no contar con los equipos complementarios para dar continuidad del uso de AP en el ciclo de cultivo, carecen de la digitalización de las líneas guía para guiar la cosecha. Esta información se obtiene en el sector agroindustrial de la caña esencialmente de dos formas:

Surcado con autoguía

La labor de surcado se realiza con el uso de piloto automático desde el inicio del ciclo del cultivo, de tal forma que sea posible obtener información de la trayectoria del surcador. Estos datos se procesan mediante herramientas informáticas para obtener líneas de trayecto útiles en la cosecha mecanizada.

Fotografía con UAV

Los UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), son dispositivos que recientemente se han incorporado a la agricultura para apoyar la tecnificación de las labores del cultivo. Para casos en los que se realiza el surcado con métodos tradicionales, es decir, sin el uso de AP, es posible obtener información digital del cultivo por medio de fotografías aéreas (ver Figura 14). Para que sea posible la digitalización de datos para generar líneas de cosecha, es necesario que la edad de la caña de azúcar no supere los 45 días (García, Herrera, & Montero, 2016), esto se debe a que la masa foliar de la planta en edades avanzadas impide que se puedan observar los surcos claramente.

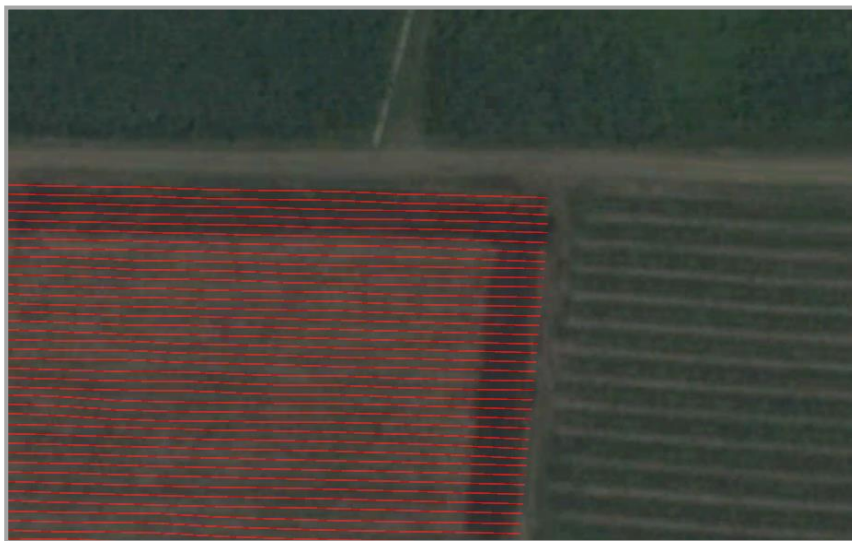


Figura 14. Imagen aérea de cultivo de caña de azúcar con proyecto de líneas para cosecha.

Las fotografías que se obtienen con UAV requieren de un procesamiento digital para atribuirles precisión y exactitud con respecto al espacio real. Esto quiere decir, que las imágenes deben coincidir con las coordenadas de la zona donde se obtuvieron, a este procedimiento se le llama Postproceso. Consiste en el uso de la información satelital cruda almacenada por una estación base *RTK* cercana y los puntos colectados por una estación móvil en la zona donde se realizó la fotografía, estos puntos se encuentran identificados en la imagen, los cuales suelen ser generalmente cuatro, uno por cada esquina de la imagen. Estos datos se cargan en un software de postprocesamiento para otorgar la precisión y exactitud de la estación *RTK*, de tal manera que el proyecto que se realizó con el UAV tiene como referencia la localización espacial de la estación base, la cual será igual para el piloto automático de la cosechadora en el momento de realizar la cosecha de precisión.

3.3.3. Surcado de precisión (autoguía)

El surcado de precisión consiste en la adecuación de los surcos para facilitar el cultivo de la caña de azúcar, esta operación se realiza con el uso de la herramienta autoguía, la cual se encuentra equipada en los tractores que dispongan de esta tecnología.

El sistema piloto automático se instala para automatizar el volante del vehículo, de tal manera que logre la ejecución de tareas con un alto nivel de precisión (trayectos en línea recta, pivotes, curvas de nivel, entre otros). La alta precisión de estas labores es posible con el uso de una señal de referencia *RTK*. Se estima que el error existente en los trayectos del surco es de aproximadamente 2.5 cm (Kingwell & Fuchsbichler, 2011), sin embargo, es preciso tener en cuenta que errores adicionales se les puede atribuir a las condiciones del suelo, desajustes del implemento o balance de pesos en el vehículo.

El operario debe controlar variables normales de operación como la aceleración, posición del implemento y los giros al final del surco. En la Figura 15 se puede observar una labor de surcado con el uso de autoguía.



Figura 15. Tractor realizando labores de surcado de precisión para caña de azúcar

3.3.4. Cosecha con proyecto de líneas (autoguía)

La labor de cosecha de precisión de caña de azúcar se realiza mediante el uso del proyecto de líneas del área, el cual se realiza por medio de los dos métodos mencionados en la sección 3.2.2. Los componentes que conforman el sistema piloto automático de la cosechadora son similares a los de un tractor de surcado, la diferencia principal radica en que el sistema electrohidráulico del primero se usa para mover las orugas de marcha de la máquina y el segundo para controlar ruedas.

El sistema piloto automático en la cosecha mecanizada representa el principio de implementación del TAC en el cultivo de la caña de azúcar, donde se busca automatizar las funciones de guiado de tal forma que se reduzca el pisoteo provocado por el paso constante e irregular de maquinaria pesada. En el desarrollo la presente tesis se estudiará a profundidad la función del piloto automático en el TAC en cosecha.

En la Figura 16 se muestra la ejecución de la labor de cosecha sin la intervención del operario en el volante, permitiendo enfocarse en las demás funciones de la cosechadora.



Figura 16. Operario realizando labores de cosecha con autoguía.

Planeación

Es de completa relevancia la definición de una metodología que facilite la adquisición de datos en el estudio del efecto de TAC en cosecha. En esta sección se propone definir estos pasos metodológicos, los cuales se llevarán a cabo en una labor comercial de cosecha de un ingenio azucarero del sector. Además, es preciso destacar los requerimientos necesarios para ejecutar la metodología como componentes fundamentales en la puesta en marcha de un caso de estudio. La etapa de planeación se compone principalmente de tres secciones: (i) Definición de la propuesta metodológica, (ii) Requerimientos para la propuesta metodológica y (iii) integración del plan de trabajo. Tal como se ilustra en la *Figura 17*, las secciones (ii) y (iii) están compuestas por un conjunto de procesos que se llevaron a cabo en la etapa de planeación.

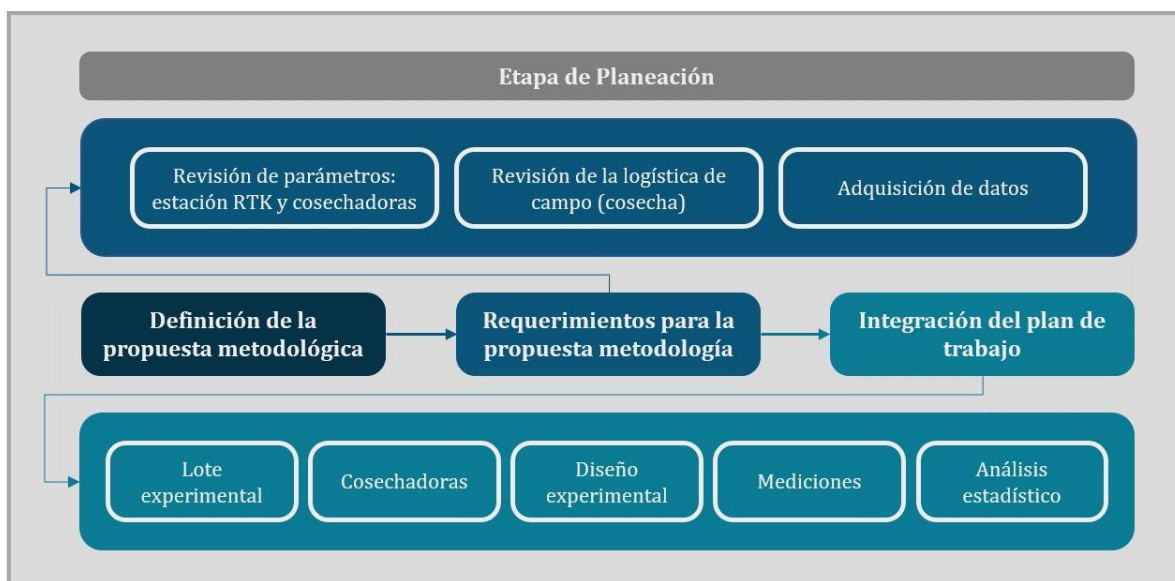


Figura 17. Diagrama descriptivo de la etapa de planeación.

4.1. Definición de la metodología para ejecutar el caso de estudio

De acuerdo con el tema de investigación y el planteamiento del problema, la guía para la ejecución, seguimiento y realización de las tareas técnicas necesarias para lograr el diseño, implementación y cumplimiento del objetivo propuesto será un *modelo lineal secuencial sin restricciones* (no es indispensable iniciar una fase al concluir una previa). Adicionalmente, se seguirá la metodología híbrida RUP-XP con el fin de dar cumplimiento a cada uno de los componentes que conforman el método.

El desarrollo y ejecución del caso de estudio se encuentra establecidos bajo una serie de pasos que serán descritos en la sección 4.2.

4.2 Definición de los requerimientos para la metodología

Como parte fundamental en el estudio del efecto de TAC en cosecha de caña de azúcar, la definición de los requerimientos para poner en marcha la metodología consta de tres partes: i) *Revisión de los parámetros establecidos por la estación RTK y las cosechadoras*, ii) *Revisión de la logística de campo para la ejecución de cosecha* y iii) *Adquisición de datos para el análisis de resultados*.

4.2.1 Revisión de los parámetros establecidos por la estación RTK y las cosechadoras

La cosecha mecanizada mediante el uso de TAC requiere que exista cobertura de señal RTK en la zona donde se planea ejecutar la labor, por lo tanto, es preciso conocer la ubicación desde donde se transmiten señales de corrección. En este aspecto es necesario recordar que a medida que el receptor se aleja de la base el error de posicionamiento aumenta. Es recomendable que la distancia máxima entre estos dos puntos no supere los 18 Km, esto con el fin de evitar dos efectos: la pérdida de coincidencia satelital debido a la curvatura de la tierra y la pérdida de línea de vista de radio comunicación entre los dos puntos.

Una vez asegurada la distancia entre base y vehículo, se pasa a revisar la conectividad de la señal RTK en las cosechadoras que hacen parte del caso de estudio. Para esta revisión se tendrán en cuenta los siguientes parámetros en la pantalla de la cosechadora.

- **Edad de corrección:** Es un parámetro visible en la pantalla de la cosechadora, se muestra si existe conectividad de RTK y puede ser interpretado como la latencia que hay entre la transmisión de las señales de radio provenientes de la estación base y el receptor del vehículo.
- **Error H:** El error horizontal es el valor medido en centímetros (cm) de la posición del vehículo en el espacio. Este parámetro figura en pantalla únicamente si existe enlace de RTK, generalmente debe oscilar entre 1 y 2.5 cm.
- **Frecuencia de enlace:** El valor de frecuencia configurado en la máquina debe coincidir con canal por el cual está transmitiendo la estación base. La frecuencia debe estar bajo los parámetros legales que establece la ANE, para fines del caso de estudio se trabajará bajo el canal 446.9875 MHz.

- **Velocidad de enlace:** Conocido en inglés como *Baud Rate*, es otro parámetro, que al igual que la frecuencia, debe coincidir en los dos puntos del enlace. Se define como la tasa de transmisión de los datos a través del radio *UHF*. Para fines de compatibilidad con los distintos fabricantes que dan uso de la estación base, se establece una velocidad de 4800 Baud.

4.2.2 Revisión de la logística de campo para la ejecución de cosecha

La labor de cosecha en campo requiere de una serie de componentes que deben estar definidos previamente para la mejor disposición de tiempos en la logística. Los componentes que deben tenerse en cuenta para ejecutar la cosecha bajo los parámetros del caso de estudio son:

- **Cosechadoras:** La cantidad de cosechadoras para ejecutar la labor se debe conformar de acuerdo con el área que se considera trabajar, de tal manera que pueda ser posible la colecta de información durante un turno laboral, el cual comprende de 12 horas. Una vez se cumpla este turno, los operarios cambian y probablemente la maquinaria también, lo cual ocasionaría ruido en el análisis de las labores por operario.
- **Vagón de transporte:** Son los vagones que se usan para el transporte de la caña cosechada hacia el ingenio. La disposición de vagones de transporte es un factor fundamental para la ejecución del caso de estudio, esto se debe a que cada cosechadora tiene asignado un vagón en particular, de tal manera que sea posible distinguir las cantidades cosechadas por cada máquina.
- **Tractores de cadeneo y vagones de auto volteo:** La cantidad de tractores y vagones para la labor deben doblar la cantidad de cosechadoras, de tal manera que, en el momento de completar un vagón, se reemplace por uno vacío, mientras este cambio se realiza, el vagón lleno descarga la caña colectada en el vagón de transporte asignado.
- **Personal operativo calificado:** Los operarios de maquinaria deben contar con el entrenamiento necesario para cumplir con los objetivos de la labor, a saber, los tractoristas deben conocer los trayectos establecidos por la planeación del ensayo, los operarios de cosecha deben contar con el entrenamiento técnico para usar todas las funcionalidades del sistema autoguía.
- **Personal de apoyo logístico:** El equipo de colaboradores para el apoyo logístico comprende las personas que se encargan de tomar registro de las actividades que realizan las cosechadoras (espera de vagones, atascamiento,

mantenimiento, abastecimiento de combustible, entre otros), esto con el fin de establecer las causas de los tiempos muertos en la labor. Además, el equipo de apoyo también lo conforma las personas encargadas de todo lo que gira en torno de la disposición de vagones, como la asignación de estos a cada cosechadora y el registro documental.

- **Personal técnico:** Es importante la presencia de un equipo técnico que se encargue de la solución ante inconvenientes de funcionamiento de la maquinaria (sistema eléctrico, hidráulico y soldadura), además, se debe contar con personal calificado para mantener en funcionamiento el sistema piloto automático de las cosechadoras.

4.2.3 Adquisición de datos para el análisis de resultados

Los modelos actuales de maquinaria agrícola—especialmente los que se encuentran equipados con sistema autoguía—tienen la posibilidad de almacenar volúmenes de información de distintas variables de funcionamiento de la cosechadora. Para fines de este estudio, solo se considera analizar el consumo de combustible y el error de trayectoria.

La información de la flota puede descargarse de dos formas: de manera local por medio de dispositivos de almacenamiento *USB*, los cuales se instalan en la pantalla de la cosechadora. La otra manera es por medio de acceso remoto al servicio de telemetría de la flota tal como se observa en la Figura 18. Los datos se almacenan en un servidor perteneciente al fabricante, de tal manera que sea posible el acceso a históricos de las labores previas.

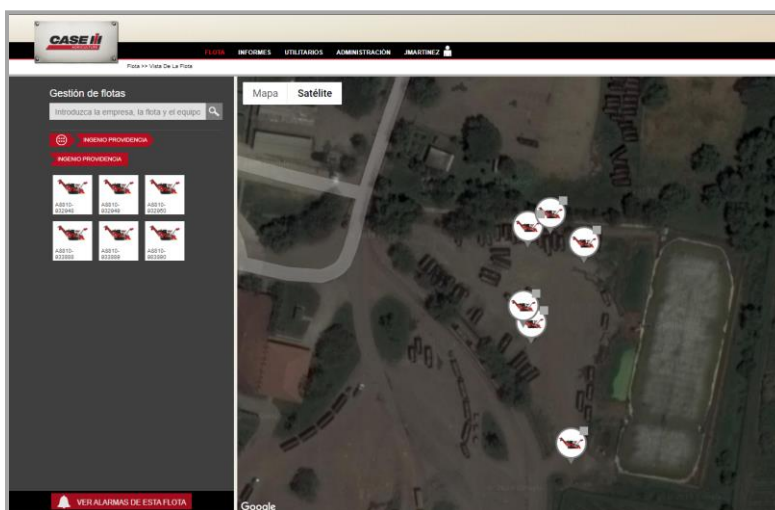


Figura 18. Control de flota de maquinaria por medio de telemetría (Case IH, 2019).

4.3. Integración del plan de trabajo para abordar el caso de estudio

El caso de estudio que será considerado para abordar el plan de trabajo hace referencia a la validación de un sistema automático de tráfico controlado para implementar agricultura de precisión en caña de azúcar; a continuación, se hace una descripción detallada de los componentes del plan de trabajo.

4.3.1. Lote experimental

El ensayo de caso de estudio se llevó a cabo en el Ingenio Providencia, Hacienda Capri - Suerte 302, la cual tiene un área productiva de 11.63 ha. La Suerte se encuentra en el mega ambiente Semiseco y está sembrada con la variedad CC 97-7170 desde 2018 (Cenicaña, 2018). Las zonas agroecológicas predominantes son las 21H0, 22H0 y la 6H1 (Cenicaña, 2018). Los suelos predominantes pertenecen en un 65% a la consociación Galpón (*GL; Subgrupo Typic Calciusterts – Perfil de suelos: CC728, CC917 y CC838*), en un 21% a la consociación Genova (*GN; Subgrupo Entic Haplustolls; Perfil de suelos: CC169, CC811 y CC812*), en un 7% a la consociación Florida (*FL; Subgrupo: Entic Haplustolls; Perfil de suelo: CC816, CC250 y CC690*) y el 7% a la consociación Cerrito – Chungular (*CE-CH; Subgrupo Entic Haplustolls-Entic Haplustolls; Perfil de suelos: CC563, CC181 y CC12*) (Cenicaña, 2018). Los grupos de humedad predominantes son H1 y H0, con un 65 y 35%, respectivamente (Cenicaña, 2018).

Las condiciones meteorológicas de producción sobre el área del lote experimental se caracterizaron por presentar, entre 2006-2018, una precipitación media anual de 720 mm, temperatura media anual de 23°C, humedad relativa media anual de 77.8% y evapotranspiración media anual (*Penman*) de 681 mm (Cenicaña, 2019). El lote experimental viene siendo sembrado de manera continua con caña de azúcar desde 1986.

4.3.2. Descripción de cosechadoras

Una total de tres máquinas cosechadoras se utilizaron en este experimento. Los modelos de todas las cosechadoras son Case IH A8810 (*Sugarcane Harvester Austoft 8810, Case IH America LLC, Racine, Wisc.*). Las cosechadoras pertenecen a un mismo frente de cosecha y se codifican como: 932948, 932949 y 932950. Para efectos prácticos de la presentación de resultados de esta tesis, se denominaron cosechadoras 48, 49 y 50, respectivamente. Cada cosechadora tiene un solo operador y cuentan con sistema de piloto automático instalado operado con monitor modelo PRO-700 (*Case IH America LLC, Racine, Wisc.*).

En la actualidad, las cosechadoras 48, 49 y 50 tienen ~3564, ~3378 y ~3368 horas del motor operadas, respectivamente.

4.3.3. Diseño experimental

El experimento propuesto se diseñó para determinar el efecto del uso de la señal *GNSS-RTK* en la cosecha mecánica de caña de azúcar, sobre el consumo de combustible y precisión de trayectos. En el experimento se tuvieron en cuenta dos momentos: cosecha en brechado y cosecha en melga. En el primero, la cosechadora se direcciona dentro del cultivo a manera de despejar área de tránsito para sí misma y para los tractores con los vagones. En el segundo, la cosechadora principalmente se direcciona a la recolección de caña de azúcar.

Se utilizó un diseño experimental completamente aleatorizado con tres repeticiones. El diseño se distribuyó sobre los tres tabloncillos de la suerte (Figura 19). La unidad experimental contó con dos zonas, la de brechado y la de melga. El área de cosecha de brechado y melga comprendió un área total equivalente a ~seis y ~doce surcos, respectivamente. El área experimental contó con líneas de surcado georreferenciadas, las cuales se utilizaron para la guía automática de la cosechadora. El factor para evaluar fue uso de señal *GNSS-RTK* (Con y sin señal).

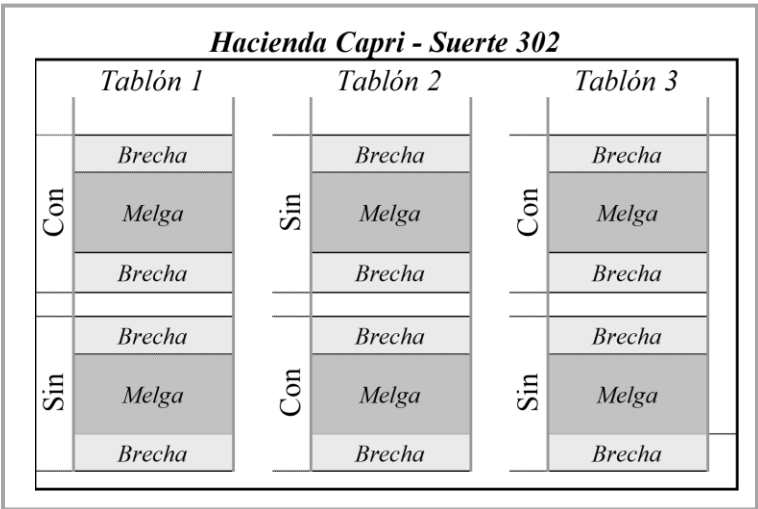


Figura 19. Esquema de diseño experimental implementado en caso de uso. Las siglas Con y Sin significa las unidades experimentales que tuvieron (con) o no (sin) activado el uso de señal *GNSS-RTK*.

Un plano digital de la distribución de las repeticiones y su aleatorización se realizaron utilizando QGIS v3.4 (Qgis, 2018). Este plano se transfirió a cada operador de máquina para su uso en la ejecución del ensayo.

4.3.4. Mediciones

El efecto de uso de señal GNSS-RTK en cosecha de caña de azúcar sobre error de trayecto con respecto al proyecto de líneas y consumo de combustible se evaluó utilizando métricas cuantitativas.

Las métricas de precisión de trayectos comprendieron un análisis de paralelismo del trayecto en zona de brecha y melga. Este análisis comprendió la medición de la diferencia entre el trayecto diseñado y trayecto realizado. En esta tesis, no se tuvieron en cuenta la dirección de las diferencias. La media y sumatoria de la diferencia se estableció por surco y por zona. Este análisis se realizó utilizando algoritmos de cálculo de distancia de vectores contenidos en el módulo de procesamiento de datos vector de QGIS v3.4 (Qgis, 2018).

Finalmente, los datos de Consumo de combustible obtenidos por medio del sistema de telemetría se procesaron de manera independiente, es decir, se realizó una clasificación según la cosechadora. Adicionalmente, esta información se analizará conforme a los dos escenarios planteados en el ensayo (brecha y melga). El procesamiento de la información de combustible se realizó por medio del software R v3.4.4 (R studio, 2019).

4.3.5. Análisis estadístico

En orden de comparar el efecto de uso de señal GNSS-RTK sobre las métricas de precisión de trayectos, un modelo lineal mixto de análisis de varianza será ajustado para cada métrica a partir del modelo básico:

$$y_{ij} = \mu + T_i + Z_j + T(Z)_i + \varepsilon_{ij} \quad (2)$$

Donde y_{ij} representa el valor observado de la precisión de trayectos en el tratamiento i de la zona j . μ representa la media general de la variable; T_i es el efecto del tratamiento de uso de señal GNSS-RTK con $i=1\dots$; Z_j es el efecto de la zona de cosecha con $j=1\dots$; $T(Z)_i$ es el efecto aleatorio de zonas dentro de tratamiento de uso de señal GNSS-RTK; y ε_{ij} es el error aleatorio.

Por su parte, en orden de comparar el efecto de uso de señal GNSS-RTK sobre las métricas de calidad de corte mecánico en cosecha, un modelo lineal mixto de análisis de varianza será ajustado para cada métrica a partir del modelo básico:

$$y_{ij} = \mu + T_i + \varepsilon_{ij} \quad (3)$$

Donde y_{ij} representa el valor observado de la métrica de consumo de combustible en cosecha en el tratamiento i ; μ representa la media general de la variable; T_i es el efecto del tratamiento de uso de señal GNSS-RTK con $i=1\dots, T$; y ε_{ij} es el error aleatorio el cual puede estar potencialmente correlacionado bajo el modelo de covarianza de correlación espacial.

Los modelos serán ajustados utilizando la librería “nlme” de R v3.4.4 (R studio, 2019). El ajuste de los modelos tendrá en cuenta la homogeneidad y heterogeneidad de varianzas para los diferentes tratamientos. El criterio de información de Akaike (AIC) será la métrica utilizada para la selección del modelo.

Pruebas

En la etapa de pruebas se realizaron actividades relacionadas con el performance de la tecnología que hace parte del objeto de estudio de esta tesis. Se revisaron dos componentes tecnológicos esenciales para ejecutar el caso de estudio: i) *pruebas de comunicación de la señal RTK* y ii) *Pruebas de funcionamiento del piloto automático para hacer TAC*. A continuación, Se describen los dos componentes que se evaluaron en esta sección.

5.1. Pruebas de comunicación de la señal RTK

Una vez establecido el lote donde se desenvuelve la evaluación de cosecha, se analiza la cobertura de señal existente desde la estación *RTK* por medio del simulador de cobertura de señales de radiofrecuencia, con esta información se obtiene una referencia de las zonas con y sin cobertura dentro del lote objeto del estudio. En la Figura 20 se ilustra la cobertura que proporciona la estación denominada CCPM, la cual se encuentra aproximadamente a 2 km del casco urbano de la ciudad de Palmira Valle. Tal como se observa, hay zonas sin cobertura de la señal de RTK, por lo cual, se procede a analizar la hacienda Capri, suerte 302.

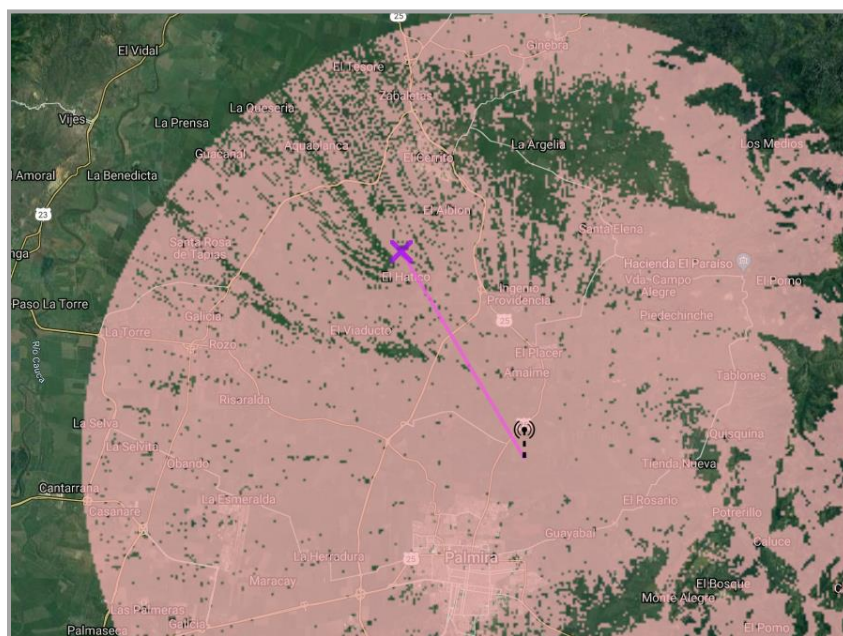


Figura 20. Cobertura de la estación CCPM (HeyWhatsThat WISP, 2019).

Al realizar una visualización más cercana del lote que se dispuso para el ensayo, se advierte de zonas sin conectividad en la zona (Figura 21). Se hipotetiza que este efecto

se debe a la masa foliar que existe en medio de la línea de vista entre la estación base y la suerte 302 de Capri. Al realizar un análisis de Línea de Vista tal como se ilustra en la Figura 22, se puede identificar la presencia del obstáculo que genera tal interferencia en la zona de la labor de cosecha.



Figura 21. Disposición de señal RTK, Capri 302 (HeyWhatsThat WISP, 2019).

En la zona sur del lote se pueden identificar volúmenes de vegetación que se presume impide la comunicación constante desde la estación base, la cual se encuentra aproximadamente a 10 km del lote de cosecha. Este análisis sugiere la necesidad de planificar una verificación de campo, la cual comprende el análisis de la señal por medio de un receptor móvil *GNSS – RTK*. Mediante esta práctica, se posibilita observar de forma más detallada el comportamiento de la señal en el área.

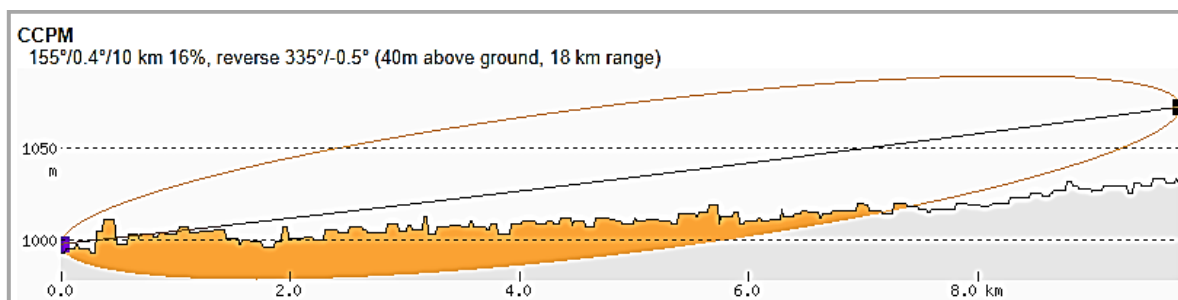


Figura 22. Perfil de línea de vista entre estación base y Capri 302 (HeyWhatsThat WISP, 2019).

La evaluación en campo consiste en la utilización de un receptor *GNSS-RTK* con características de funcionamiento similares a las de la tecnología que se encuentra instalada en las cosechadoras. Debido a la practicidad para realizar los desplazamientos, se realiza la adecuación del receptor móvil en un automóvil para facilitar la obtención de datos alrededor del lote. Una estructura metálica se instala para simular la altura de las cosechadoras, la cual es de 5 m. En el extremo de la estructura se instala la antena receptora de radio *UHF* para la obtención de datos provenientes de la estación CCPM.

En la Figura 23, se ilustra la composición del dispositivo que se utilizó en la etapa de medición en campo, donde se identifica una antena de recepción *GNSS* y una antena de radio conectadas a una pantalla, una interfaz RS-232 para la adquisición de datos y un suministro de energía. Estos dispositivos se instalaron en el vehículo de pruebas.

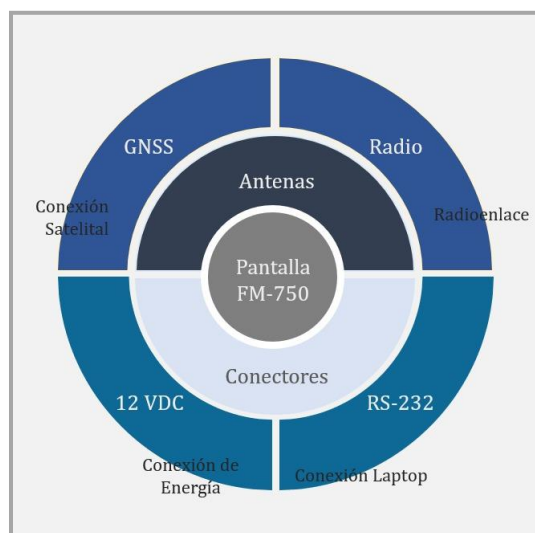


Figura 23. Composición del dispositivo móvil de recepción RTK.

La pantalla de pruebas entrega información detallada de posicionamiento en el espacio, a saber: distancia entre base y receptor, coordenadas actuales, Nombre de la estación base, edad de corrección, porcentaje de rendimiento *CMR* y error H. Para fines de almacenar la información mientras se realiza el desplazamiento en el vehículo de pruebas, se almacenan los datos crudos de corrección en posicionamiento, esta información se encuentra codificada en un formato denominado trama *NMEA 0183* (National Marine Electronics Association). Estos paquetes de información se adquieren por medio del puerto serie del receptor a una tasa de 1 Hz y entregan datos detallados de forma dinámica.

El standard *NMEA 0183* contiene un listado de 25 tramas que entrega distintos grupos de información, entre ellas se encuentra la trama *GGA* (*Time, position, and fix related data*). Este grupo de datos se enfoca en mostrar información relacionada con

sistemas de corrección de posicionamiento como el *RTK* (Trimble, 2019). En la Tabla II se explica en detalle los componentes que conforman la trama *GGA*. En el campo número 6 se identifica la calidad de corrección *RTK*. Cuando es equivalente a 4, significa que hay corrección de movimiento en tiempo real.

Tabla II Descripción de la trama GGA (Trimble, 2019).

Campo	Descripción
0	Message ID \$GPGGA
1	Hora UTC
2	Latitud
3	Dirección de latitud
	N: norte
	S: Sur
4	Longitud
5	Dirección de longitud:
	E: Este
	W: Oeste
6	Indicador de calidad GPS:
	0: Sin corrección
	1: Autónomo
	2: Corrección diferencial, OmniSTAR VBS
	4: Real-Time Kinematic
	5: RTK, OmniSTAR XP/HP
7	Número de satélites visibles
8	HDOP
9	Altura ortométrica
10	M: Unidad de la medición de altura ortométrica en metros
11	Separación del geoide
12	M: Separación del geoide medida en metros
13	Edad de corrección diferencial
14	ID de estación de referencia
15	Checksum

Esta información se almacena en un formato “.csv” y se procesa en un software de Sistemas de información Geográfico con el fin de identificar las zonas con cobertura en el lote. Al revisar los datos de posicionamiento ilustrados en la Figura 24, se puede deducir que la cantidad de espacios con déficit de señal son pocos, indicando que las

condiciones del lote son aceptables para la cosecha usando TAC con sistema *RTK* en la maquinaria agrícola.



Figura 24. Mapa de conectividad RTK, Capri 302.

5.2. Pruebas de funcionamiento del piloto automático para hacer TAC

La etapa de pruebas de recepción de señales en las cosechadoras se realiza con el fin corroborar que el procesamiento del proyecto de líneas concuerda con la posición de la máquina en los surcos del lote. Consiste en usar una cosechadora equipada con piloto automático para validar la carga satisfactoria del proyecto de líneas. La única condición que se debe cumplir para que funcione la carga de mapas en la pantalla de la máquina es que el porcentaje del *CMR* supere el 70%. Esta medida de seguridad obliga al sistema a que desempeñe labores de piloto automático únicamente cuando la calidad de enlace sea óptima para obtener los resultados de posicionamiento esperados (~ 2.5 cm de error de desplazamiento).

La pantalla de la cosechadora proporciona información acerca de la calidad de enlace *CMR*, tal como se ilustra en la Figura 25, facilitando el diagnóstico de comunicación en la zona donde se pretenden realizar las labores de piloto automático con proyecto de líneas.



Figura 25. Panel de diagnóstico de CMR en pantalla Pro700.

Resultados & Discusiones

6.1. Resultados

Brecha de distancia de trayecto (Pisoteo)

La Figura 26 muestra el mapa de brecha de distancia de trayecto entre las líneas de surcado y el recorrido de la cosechadora en todas las parcelas y zonas. En general, se observan mayores brechas de distancia en las parcelas sin piloto automático y viceversa. Complementariamente, la Figura 27 muestra las brechas de acuerdo con el tipo de zona y uso de piloto, ratificando el efecto de uso de autoguía.

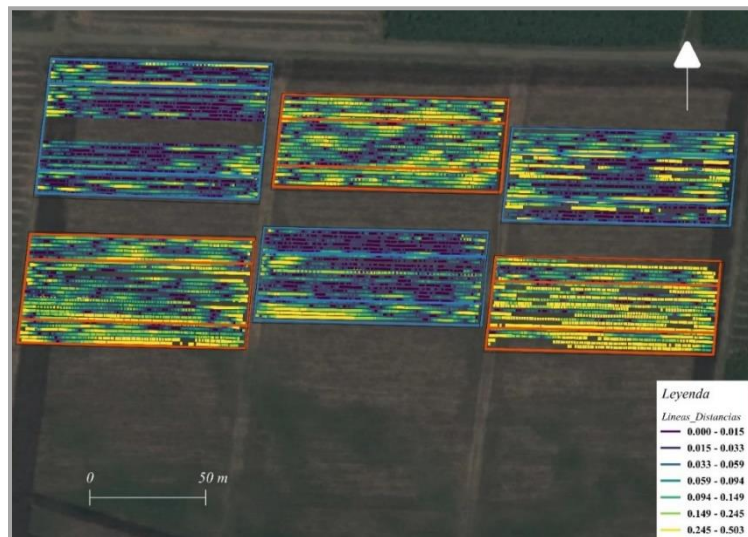


Figura 26. Mapa de brecha de distancia en los trayectos de las cosechadoras.

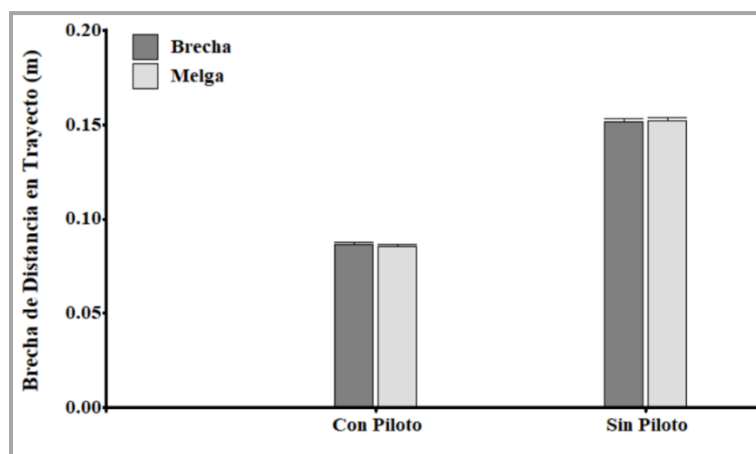


Figura 27. Brechas de distancia según tipo de zona y uso de autoguía.

Los resultados de brechas sugieren un claro y significativo efecto del uso del piloto. Estos resultados se esperaban, debido a que el uso del piloto permite que la cosechadora se desplace a través de las líneas de cosecha con alto nivel de precisión. Además, los resultados son novedosos debido a que no se encontró evidencia de trabajos previos que reporten magnitudes de brechas de distancias con el uso de piloto automático durante la cosecha mecanizada de caña de azúcar.

Consumo de combustible

La Figura 28 muestra el efecto conjunto de uso de piloto por zona de cosecha sobre el combustible utilizado. En general, se observa mayor cantidad de combustible utilizado sin el uso del piloto. No se identifica una correlación entre uso de piloto y zona de cosecha, lo cual sugiere un efecto directo del uso del piloto sobre esta métrica. El efecto de uso del piloto se debe a que el desplazamiento de la cosechadora se mantiene constante a través de los surcos.

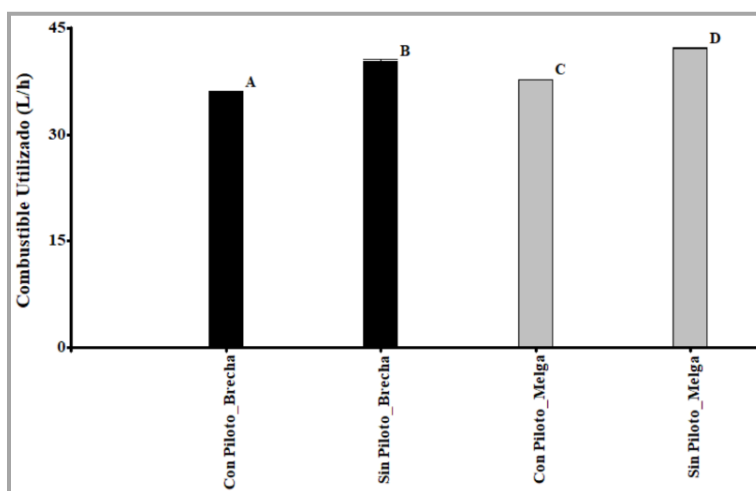


Figura 28. Consumo de combustible según tipo de zona y uso de autoguía. Medias con letra común no tienen diferencia significativa (valor $p > 0.05$; Prueba DMS Fischer).

Potencia de Motor

La Figura 29 muestra el efecto conjunto de uso de piloto por zona de cosecha sobre la potencia del motor. En general, se observa mayor demanda de potencia sin el uso del piloto. No se identifica una correlación entre uso de piloto y zona de cosecha, lo cual sugiere un efecto directo del uso del piloto sobre esta métrica. El efecto de uso del piloto se debe a que la máquina mantiene una aceleración constante durante la operación de cosecha ya que se desplaza constantemente a través de los surcos sin presentar desviaciones.

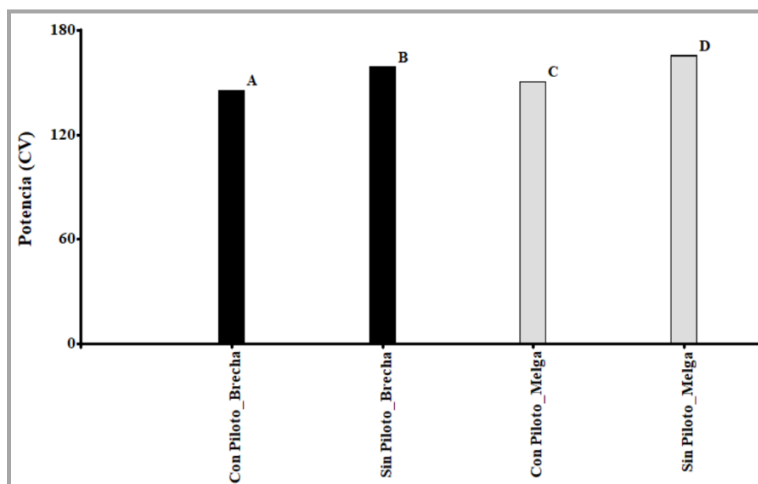


Figura 29. Potencia del motor según tipo de zona y uso de autoguía. Medias con letra común no tienen diferencia significativa (valor $p > 0.05$; Prueba DMS Fischer).

Velocidad

La Figura 30 muestra el mapa de velocidad en el recorrido de las cosechadoras en todas las parcelas y zonas. En general, se observa un aumento de la velocidad en las parcelas sin piloto y viceversa. Complementariamente, la Figura 31 muestra la velocidad de acuerdo con el tipo de zona y uso de piloto, ratificando el efecto de uso de autoguía.

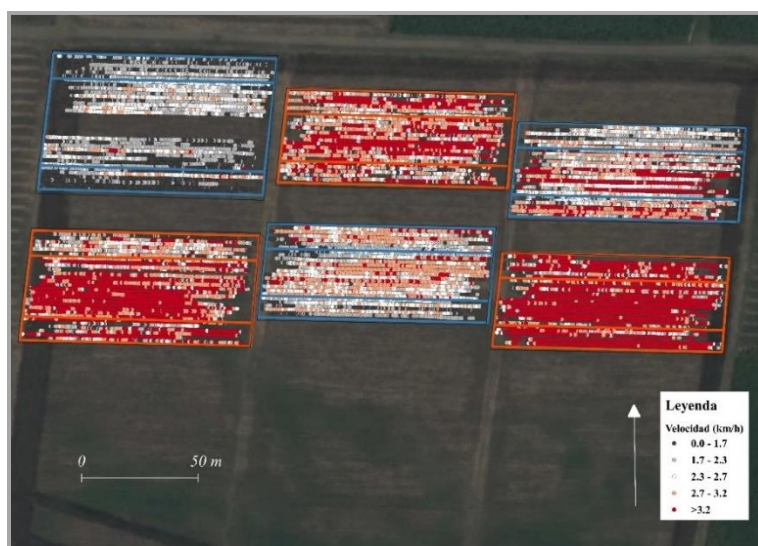


Figura 30. Mapa de velocidad en los trayectos de las cosechadoras.

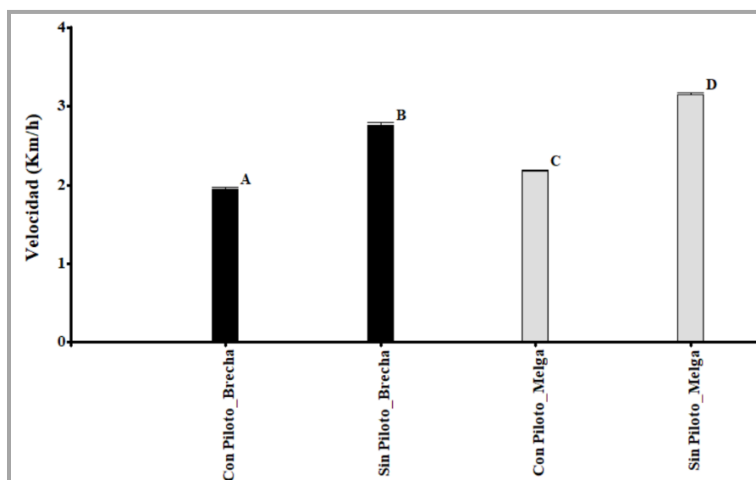


Figura 31. Velocidad según tipo de zona y autoguía. Medias con letra común no tienen diferencia significativa (valor $p > 0.05$; Prueba DMS Fischer).

Los resultados de velocidad sugieren un claro y significativo efecto del uso del piloto. Estos resultados se esperaban, debido a que el uso del piloto permite que la cosechadora se desplace de forma centrada hacia las hileras de caña de azúcar con una tendencia a disminuir la velocidad para evitar atascamientos. Además, los resultados son novedosos debido a que no se encontró evidencia de trabajos previos que reporten diferencias de velocidad con el uso de piloto automático durante la cosecha mecanizada de caña de azúcar.

Relación Velocidad – Combustible utilizado

La Figura 32 muestra el efecto de la velocidad de desplazamiento de cosecha sobre el combustible utilizado. En general, se observa mayor combustible utilizado, sin piloto. No se identifica una correlación entre uso de piloto y zona de cosecha, lo cual sugiere un efecto directo del uso del piloto sobre esta métrica. El efecto de uso del piloto se debe a que la máquina mantiene una aceleración constante durante la operación de cosecha ya que se desplaza constantemente a través de los surcos sin presentar desviaciones, lo que sugiere un menor esfuerzo para el motor y, en consecuencia, un menor consumo de combustible.

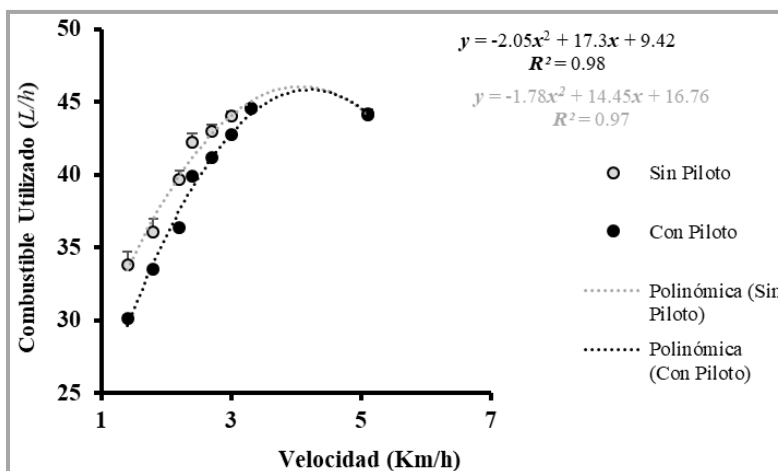


Figura 32. Combustible utilizado según la velocidad.

Efecto del tipo de suelo sobre el uso de piloto automático

La Figura 33 muestra el mapa de tipo de suelo del lote Capri 302. En general, se observan la conformación de diferentes tipos de suelo en el área del caso de estudio. Complementariamente, la Figura 34 muestra el comportamiento de la velocidad según la conformación del suelo y el uso o no uso del piloto automático.

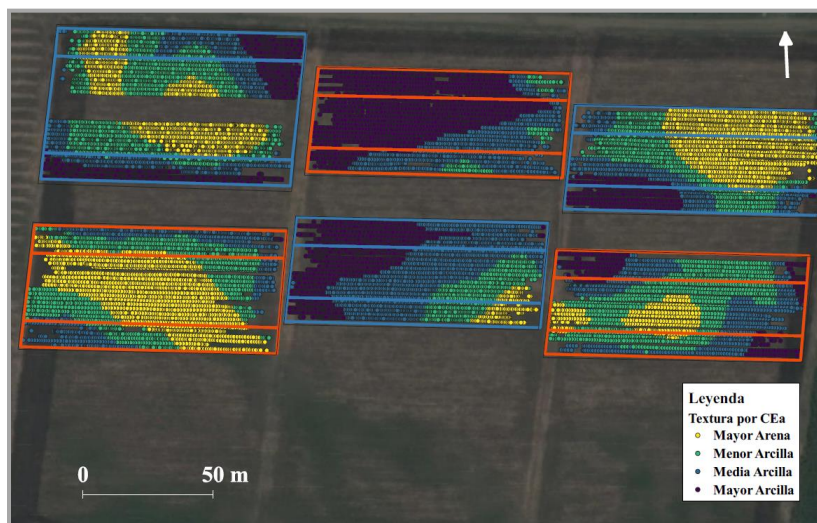


Figura 33. Mapa de tipo de suelo.

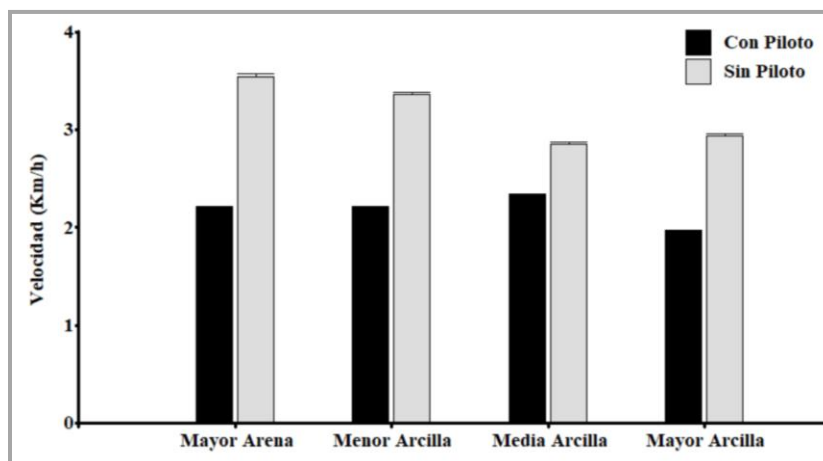


Figura 34. Relación de velocidad con textura de suelo.

Los resultados de velocidad sugieren un claro y significativo efecto del uso del piloto. Estos resultados se esperaban, debido a que el uso del piloto permite mantener la velocidad de operación conforme al tipo de suelo. Además, los resultados son novedosos debido a que no se encontró evidencia de trabajos previos que reporten registros de velocidad en diferentes tipos de suelo con el uso de piloto automático durante la cosecha mecanizada de caña de azúcar.

Análisis de eficiencia de tiempo en cosecha.

La Tabla III muestra el análisis de métricas de tiempo durante la cosecha. La eficiencia de campo fue mayor en melga con el uso del autoguía. Además, se observa un menor porcentaje de paros por atascamiento tanto en brecha como en melga. El uso de piloto automático no presentó interacción entre paros ocasionados por otras causas, tanto en brecha como en melga.

Tabla III Análisis de tiempos en la operación de cosecha.

Métricas en %	Zona	Uso de piloto	
		Sin piloto	Con piloto
Eficiencia de campo	Brecha	77.4	77.3
	Melga	69.3	74.5
Paros por atascamiento	Brecha	6.0	4.2
	Melga	16.1	10.6
Paros por otras causas	Brecha	16.6	18.5
	Melga	14.6	14.9

6.2. Discusión general

Un sistema de TAC fue descrito y evaluado en esta tesis. Para la evaluación se utilizó un caso de estudio, en el cual se determinó el efecto de uso del sistema descrito sobre métricas operativas de cosechas mecanizadas de caña de azúcar.

Los resultados del caso de estudio sugieren que existe un efecto de uso del piloto automático principalmente, en métricas operativas tales como: Error de trayectoria, potencia de motor, uso de combustible, velocidad y eficiencia de tiempo de cosecha. El efecto de uso de piloto fue heterogéneo, siendo contundente para las tres primeras métricas y menos contundente para las dos últimas. A continuación, se discutirán los resultados para cada métrica.

- El error de trayectoria disminuyó contundentemente con el uso de piloto y, por ende, se redujo el pisoteo. Este resultado es destacado, teniendo en cuenta que el TAC puede generar un menor impacto ambiental desde diversos aspectos tales como: conductividad hidráulica del suelo, difusividad de gases del suelo, crecimiento y funcionalidad radicular, productividad y emisión de gases con efecto invernadero (Soane & Ouwerkerk, 2013). En este contexto, el TAC a partir del uso de GNSS-RTK está ofreciendo al sector cañero colombiano, la oportunidad de restauración física funcional del suelo y por ende, mejorando el potencial productivo del cultivo.
- La demanda de potencia del motor fue menor con el uso de piloto, tanto en brecha como en melga. Debido a esto, el consumo de combustible correspondió siendo menor con uso de piloto. Este resultado es clave, ya que plantea dos tipos de beneficios simultáneos de utilizar TAC en cosecha mecanizada de caña de azúcar, complementarios a los ya planteados. Estos beneficios son: (i) aumento de la eficiencia de uso de combustible; y (ii) aumento en la eficiencia de uso de motor. Variables econométricas de estos beneficios deben ser medidas en futuros trabajos, para cuantificar sus efectos económicos a escala sectorial. En esta discusión se hipotetiza que estos beneficios plantean un suficiente y sólido respaldo financiero para amortizar la inversión de la implementación de un sistema TAC para la cosecha mecanizada de caña de azúcar.
- La velocidad de cosecha fue menor con el uso de piloto, tal y como se planteó en los resultados reportados. Sin embargo, este resultado fue inesperado y se puede explicar desde el régimen utilizado y simultaneo de uso de motor de la

cosechadora y error de trayectoria. Esta información revela una relación entre el consumo de combustible, la potencia del motor y la velocidad.

- Tal como se observó en la Tabla III, existe una reducción en los paros por atascamientos durante la operación. Ante estos resultados, es necesario replicar el proceso metodológico planteado en esta tesis, con el fin de identificar si la disminución de velocidad y combustible frente a los paros por atascamiento pueden tener un impacto sobre el rendimiento operativo de la cosecha.
- Con respecto a la velocidad frente al tipo de suelo durante la labor con piloto, se observa una tendencia a mantener fija la velocidad de operación frente a los distintos tipos de suelo (mayor arena, menor arcilla, media arcilla y mayor arcilla). Los resultados de velocidad sin el uso de piloto registran una disminución al pasar de zonas arenosas a arcillosas. Se considera que el impacto en el consumo de combustible se debe a las variaciones de velocidad durante la operación; por lo que se sugiere analizar en trabajos futuros el comportamiento de esta variable con respecto al tipo de suelo y el uso del piloto automático.

Conclusiones

El TAC en cosecha de caña de azúcar es una alternativa en la automatización de las operaciones agrícolas. La carencia de información que demuestre los beneficios de su uso representa una oportunidad para la creación de escenarios que identifique variaciones en las condiciones operativas y logísticas. La interpretación de los datos obtenidos a partir de la labor de TAC puede contribuir de manera potencial al desarrollo de estrategias que reduzca el impacto ambiental producido por la mecanización de la cosecha.

A partir de la evaluación del sistema de transmisión *GNSS-RTK* aplicado al uso de piloto automático en cosecha de caña de azúcar, se logró caracterizar los componentes tecnológicos y logísticos que requiere el TAC para su adaptación al cultivo. Fue necesaria la identificación de parámetros—principio de funcionamiento de *RTK*, condiciones de campo y conectividad del piloto automático —para la ejecución de un caso de estudio en cosecha.

La investigación acerca de los requerimientos para hacer TAC en caña de azúcar contribuyó al diseño metodológico designado para evaluar el desempeño del piloto automático en cosecha. El caso de estudio sobre el cual se implementó el método se centró en la obtención de métricas de consumo de combustible y error de trayectorias. Mediante la obtención de esta información, se logró consolidar la metodología tecnológica para la validación de TAC en cosecha de caña de azúcar.

Con la metodología de validación de TAC establecida, se llevó a cabo un caso de estudio para obtener variables de operación que indicaron ventajas del uso de TAC, a saber:

- El consumo de combustible durante la operación de cosecha con piloto automático resultó ser inferior en brecha y melga en comparación con la cosecha tradicional.
- Se identificó una reducción de la velocidad de avance en la cosecha con TAC, obteniendo disminuciones en la demanda de potencia del motor; este resultado junto con una reducción en el atascamiento sugiere que el TAC aporta mejoras para en rendimiento operativo.
- El uso de piloto automático en la cosecha redujo las brechas de paralelismo y a su vez el pisoteo. Con esto se espera disminuir la degradación del suelo y la resiembra en zonas afectadas por el tráfico de maquinaria agrícola.

- El efecto del tipo de suelo sobre la velocidad de la cosechadora no presentó diferencias cuando la labor se realizó con TAC; en contraste, el no uso de piloto automático resultó en variaciones de velocidad en la operación, lo cual supone un efecto en el consumo de combustible.

Por medio de los resultados obtenidos en la ejecución del caso de estudio, se validó una metodología para la evaluación de TAC usando *GNSS-RTK*, donde se obtuvieron métricas cuantitativas que mostraron el desempeño del uso de piloto automático en cosecha de caña de azúcar. A la luz de estos resultados, se hizo evidente que condiciones como: tipo de suelo, fabricante de la cosechadora, hora del día o clima pueden tener un impacto en las métricas. En consecuencia, se espera realizar nuevas ejecuciones de la metodología en diferentes escenarios de cosecha, con el propósito de validar el uso de TAC en distintas condiciones.

La presente tesis aporta resultados del desempeño del piloto automático en las labores de caña de azúcar. Nuevos trabajos son requeridos para validar aspectos logísticos y operativos tales como: (i) Uso de piloto tanto en cosechadoras como en tractores, (ii) operación en turno nocturno, (iii) desempeño con cosechadoras de diferentes fabricantes, (iv) operación en condiciones de invierno, (v) performance con diferentes variedades de caña de azúcar. Además, la telemetría de cosechadoras requiere su validación y aporte al TAC, el cual, en cosecha mecanizada de caña de azúcar, es incipiente.

Recomendaciones

La conectividad de señal de *RTK* se estableció bajo el formato *CMR+*, debido a que es la configuración de las estaciones base de la red del Centro de investigación de la caña de azúcar de Colombia (CENICAÑA). Esta configuración se usa para crear compatibilidad de conexión para distintos fabricantes de receptores (Celades, et. al, 2018). En el caso de trabajar con sistemas de *RTK* donde el transmisor o receptor pertenecen al mismo fabricante, es posible establecer conexión con un formato más genérico como el *RTCM 3.x*. La funcionalidad del sistema de corrección no se ve afectada por este cambio.

Se recomienda realizar una medición previa del estado de la señal *RTK* en la zona que se considera evaluar. Los simuladores de emisión de radiofrecuencia muestran una aproximación del comportamiento de la señal y se basan en modelos terrestres que pueden cambiar con nuevas fuentes de obstaculización en la línea de vista, por esta razón se recomienda realizar una inspección presencial con el uso de herramientas de recepción *GNSS-RTK*, de esta manera es posible evaluar la factibilidad de trabajar con señales de corrección en la zona.

Trabajos futuros

Dado a que la evaluación de variables como combustible y error de trayectoria son susceptibles ante condiciones climáticas y ambientales, se desconoce el comportamiento de la operación de maquinaria bajo otros escenarios en el marco de ejecución del caso de estudio. Se propone la evaluación de distintas condiciones de cosecha tales como: (i) Uso de piloto tanto en cosechadoras como en tractores, (ii) operación en turno nocturno, (iii) desempeño con cosechadoras de diferentes fabricantes, (iv) operación en condiciones de invierno, (v) performance con diferentes variedades de caña de azúcar.

El sistema de comunicación *NTRIP* es una alternativa para la transmisión de *RTK* por medio de internet. Con esta solución existe la posibilidad de reducción de costos en infraestructura (torres, monumentación, cableado, entre otros), actualmente no se destaca su uso debido a la escasa comunicación móvil en el área rural. Por lo tanto, se requiere investigación acerca de los métodos para establecer comunicación móvil estable en los cultivos de caña de azúcar.

Con el uso del sistema de telemetría equipado en las cosechadoras, es posible investigar acerca del comportamiento de las señales emitidas por los sensores de las máquinas. Por medio de herramientas como el machine learning o la inteligencia artificial, se pueden identificar comportamientos anómalos en las cosechadoras que sugieren asistencia técnica. Este estudio tiene una potencial aplicación en la ejecución del mantenimiento predictivo de maquinaria agrícola.

Referencias

- Aguilera Esteban, D. A., de Souza, Z. M., Tormena, C. A., Lovera, L. H., de Souza Lima, E., de Oliveira, I. N., & de Paula Ribeiro, N. (2019). Soil compaction, root system and productivity of sugarcane under different row spacing and controlled traffic at harvest. *Soil and Tillage Research*, 187, 60-71.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2018.11.015>
- Articles-6202_informe_final_asignacion_pso_003_2018_bandas_bajas.pdf*. (s. f.). Recuperado de https://www.mintic.gov.co/portal/604/articles-6202_informe_final_asignacion_pso_003_2018_bandas_bajas.pdf
- Articles-6202_resolucion_2142_28_agosto_2019_bandas_bajas.pdf*. (s. f.). Recuperado de https://www.mintic.gov.co/portal/604/articles-6202_resolucion_2142_28_agosto_2019_bandas_bajas.pdf
- Bacci, G., Falletti, E., Fernández-Prades, C., Luise, M., Margaria, D., & Zanier, F. (2012). Satellite-Based Navigation Systems. En *Satellite and Terrestrial Radio Positioning Techniques* (pp. 25-74). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382084-6.00002-7>
- Bongiovanni, R., & Lowenberg-Deboer, J. (2004). Precision Agriculture and Sustainability. *Precision Agriculture*, 5(4), 359-387.
<https://doi.org/10.1023/b:prag.0000040806.39604.aa>
- Chen, H., & Yang, Y. (2015). Effect of controlled traffic system on machine fuel saving in annual two crops region in North China Plain. *Soil and Tillage Research*, 153, 137-144. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.06.001>
- Consulta la cobertura de los servicios móviles de Claro Colombia. (s. f.). Recuperado 2 de noviembre de 2019, de <https://www.claro.com.co/personas/soporte/mapas-de-cobertura/>
- Datasheet—TDL 450L and TDL 450H Radio—English A4—Screen.pdf*. (s. f.). Recuperado de <https://geospatial.trimble.com/sites/default/files/2019-03/Datasheet%20-%20TDL%20450L%20and%20TDL%20450H%20Radio%20-%20English%20A4%20-%20Screen.pdf>
- García, C. E., Herrera, F. A., & Montero, D. (2016). Levantamiento de información topográfica mediante vehículos aéreos no tripulados en un enfoque de agricultura de precisión. 2016. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/315663222_LEVANTAMIENTO_DE_INFORMACION_TOPOGRAFICA_MEDIANTE_VEHICULOS_AEREOS_NO_TRIPULADOS_EN_UN_ENFOQUE_DE_AGRICULTURA_DE_PRECISION

- Gasso, V., Oudshoorn, F. W., Sørensen, C. A. G., & Pedersen, H. H. (2014). An environmental life cycle assessment of controlled traffic farming. *Journal of Cleaner Production*, 73, 175-182.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.044>
- Guenette, K. G., & Hernandez-Ramirez, G. (2018). Tracking the influence of controlled traffic regimes on field scale soil variability and geospatial modeling techniques. *Geoderma*, 328, 66-78.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.04.026>
- HeyWhatsThat WISP. (s. f.). Recuperado 2 de noviembre de 2019, de <http://wisp.heywhatsthat.com/>
- Kaplan, E. D., & Hegarty, C. (2017). *Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications, Third Edition*. Artech House.
- Kingwell, R., & Fuchsbichler, A. (2011). The whole-farm benefits of controlled traffic farming: An Australian appraisal. *Agricultural Systems*, 104(7), 513-521.
<https://doi.org/10.1016/j.agry.2011.04.001>
- McClure, J. A., Collins, D. M., & Timm, J. T. E. (2009). *United States Patent N.º US20090099730A1*. Recuperado de <https://patents.google.com/patent/US20090099730A1/en?q=hidraulic&q=auto&q=steering&q=gnss&q=rtk&q=agriculture&oq=hidraulic+auto+steering+gnss+rtk+agriculture>
- Mitchell, J. P., Carter, L. M., Reicosky, D. C., Shrestha, A., Pettygrove, G. S., Klonsky, K. M., ... Dunning, L. (2016). A history of tillage in California's Central Valley. *Soil and Tillage Research*, 157, 52-64. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.10.015>
- Molin, J. P. (2016). *Precision Agriculture in Latin America*. Recuperado de <https://www.infoag.org/presentations/2378.pdf>
- Muhr, T., & Noack, P. (2010, marzo 9). *Review of RTK Correction Sources for Agricultural Applications in Germany*. Recuperado de 2 International Conference on Machine Control & Guidance Proceedings.
- NMEA-0183 message: GGA. (s. f.). Recuperado 7 de noviembre de 2019, de https://www.trimble.com/OEM_ReceiverHelp/V4.44/en/NMEA-0183messages_GGA.html
- Oliver, M. A. (2010). *Geostatistical Applications for Precision Agriculture*. Springer Science & Business Media.
- (PDF) Toward a precision agricultural implementation for sugar cane plantations in southwestern region of Colombia, South America. (s. f.). Recuperado 4 de diciembre de 2019, de ResearchGate website:
https://www.researchgate.net/publication/327732001_Toward_a_precision_agricultural_implementation_for_sugar_cane_plantations_in_southwestern_region_of_Colombia_South_America?channel=doi&linkId=5ba146c0299bf13e603bb726&showFulltext=true

- Perez-Ruiz, M., Slaughter, D. C., Gliever, C., & Upadhyaya, S. K. (2012). Tractor-based Real-time Kinematic-Global Positioning System (RTK-GPS) guidance system for geospatial mapping of row crop transplant. *Biosystems Engineering*, 111(1), 64-71. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.10.009>
- Reina, G., Milella, A., & Galati, R. (2017). Terrain assessment for precision agriculture using vehicle dynamic modelling. *Biosystems Engineering*, 162, 124-139. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.06.025>
- RESL. N° 04201 DIC 27 de 2018.pdf. (s. f.). Recuperado de <http://www.aerocivil.gov.co/normatividad/Resoluciones%20TA%202018/RESL.%20%20N%C2%B0%2004201%20%20DIC%2027%20de%20%202018.pdf>
- Saunders, S. R., & Aragón-Zavala, A. (2007). *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*. John Wiley & Sons.
- Soane, B. D., & Ouwerkerk, C. van. (2013). *Soil Compaction in Crop Production*. Elsevier.
- Stafford, J., & Werner, A. (Eds.). (2003). *Precision Agriculture*. <https://doi.org/10.3920/978-90-8686-514-7>
- Wang, J. J. H. (2012). Antennas for Global Navigation Satellite System (GNSS). *Proceedings of the IEEE*, 100(7), 2349-2355. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2011.2179630>
- Water Conservation and Landforming. (2015, enero 29). Recuperado 2 de noviembre de 2019, de Topcon Positioning Systems, Inc. website: <https://www.topconpositioning.com/agriculture/water-conservation-and-landforming>
- Zhang, N., Wang, M., & Wang, N. (2002). Precision agriculture—A worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture*, 36(2-3), 113-132. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(02\)00096-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00096-0)